



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

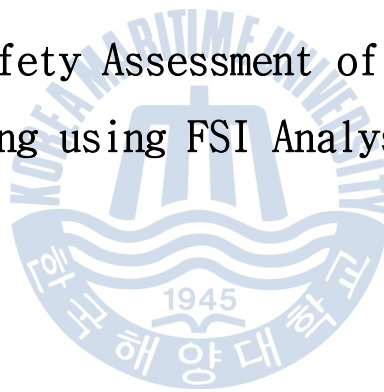
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

유체-구조 연성 해석기법을 이용한  
선박의 충돌 및 좌초 구조 안전성 평가

Structural Safety Assessment of Ship Collision  
and Grounding using FSI Analysis Technique



지도교수 이 상 갑

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

ZHAO TUO



본 論文을 ZHAO TUO의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



위원장  
위 원  
위 원

박 석주 (인)  
손 경호 (인)  
이 상갑 (인)

2014년 2월 일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

목 차 .....	i
<b>List of Tables</b> .....	iii
<b>List of Figures</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>1. 서 론</b> .....	<b>1</b>
<b>2. 충돌 및 좌초 시나리오와 모델링</b> .....	<b>4</b>
2.1 재료의 파단기준 .....	5
2.2 충돌 및 좌초 모델 .....	8
2.3 충돌 및 좌초 시나리오 .....	16
<b>3. 실선 충돌 시뮬레이션을 통한 구조 안전성 평가</b> .....	<b>9</b>
3.1 500톤 연안대형어선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과 .....	19
3.2 1,000톤 원양어선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과 .....	21
3.3 3,700톤 일반화물선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과 .....	23
3.4 10,500톤 석유제품운반선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과 .....	25
3.5 35,000톤 유조선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과 .....	28
3.6 충돌 시나리오에 따른 선측구조 안전성 평가 고찰 .....	38
<b>4. 운반용기 및 운반물의 내충돌 안전성 평가</b> .....	<b>9</b>
4.1 운반용기 및 운반물의 내충돌 응답해석 결과 .....	39
4.2 운반용기 및 운반물의 내충돌 안전성 평가 고찰 .....	46
<b>5. 실선 좌초 시뮬레이션을 통한 구조 안전성 평가</b> .....	<b>81</b>
5.1 실선 좌초 시뮬레이션 결과 .....	48
5.2 좌초선박 선저부의 좌초에 따른 안전성 평가 .....	53
5.3 선저부의 좌초에 따른 안전성 평가 고찰 .....	54

6. 결 론 .....	54
참고문헌 .....	57



## List of Tables

<b>Table 1</b> Principal particular of striking and struck(grounding) ships (unit: ton, m) .....	4
<b>Table 2</b> Type and number of container boxes and drums .....	4
<b>Table 3</b> Material properties of ASTM 569 .....	6
<b>Table 4</b> Material properties of mild and high tensile steels .....	7
<b>Table 5</b> Damage states in side inner hull of struck ship with DWT 35,000 ton striking ship .....	37
<b>Table 2</b> Type and number of container boxes and drums .....	4



## List of Figures

<b>Fig. 1</b> Sketch of penalty coupling algorithm (Aquelet et al. 2006) .....	2
<b>Fig. 2</b> Grounding test double hull model ADH/PD328V of NSW (Rodd and Sikora 1995) .....	5
<b>Fig. 3</b> Grounding test model and simulation of ADH/PD328V model (Lee 2007) .....	6
<b>Fig. 4</b> Stress-strain curve of ASTM 569 .....	6
<b>Fig. 5</b> Comparison of simulation responses to grounding test results of ADH/PD328V (Lee 2007) .....	7
<b>Fig. 6</b> Strain rate effect .....	8
<b>Fig. 7</b> Stress-strain curve of mild & high tensile steel .....	8
<b>Fig. 8</b> Full-scale ship collision and grounding simulation models .....	11
<b>Fig. 9</b> Grounding scenario and model .....	11
<b>Fig. 10</b> F.E. configuration of container boxes and drums .....	13
<b>Fig. 11</b> F.E. configuration of drums .....	14
<b>Fig. 12</b> General arrangement and principal particulars of specialized ship .....	14
<b>Fig. 13</b> Midship section of specialized ship .....	15
<b>Fig. 14</b> F.E. configuration of shell guide with container boxes in cargo hold .....	15
<b>Fig. 15</b> Collision scenario of DWT 500 ton striking ship in ballast and full loading conditions with perpendicular in standstill .....	16
<b>Fig. 16</b> Collision scenario of DWT 1,000 ton striking ship in ballast and full loading conditions with perpendicular in service .....	16
<b>Fig. 17</b> Collision scenario of DWT 3,700 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 70 degree in service .....	17
<b>Fig. 18</b> Collision scenario of DWT 10,500 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 80 degree in service .....	17
<b>Fig. 19</b> Collision scenario of DWT 35,000 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 80 degree in service .....	17
<b>Fig. 20</b> Grounding scenario of specialized ship in full load condition .....	18
<b>Fig. 21</b> Collision response behavior of DWT 500 ton striking ship in full loading condition with perpendicular in stationary .....	20

<b>Fig. 22</b> Collision response behavior of DWT 1,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in service .....	22
<b>Fig. 23</b> Collision response behavior of DWT 3,700 ton striking ship in ballast condition with attack angle 70° in service .....	24
<b>Fig. 24</b> Collision response behavior of DWT 10,500 ton striking ship in ballast condition with attack angle 80° in service .....	26
<b>Fig. 25</b> Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in standstill .....	30
<b>Fig. 26</b> Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in service .....	32
<b>Fig. 27</b> Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with attack angle 80° in service .....	34
<b>Fig. 28</b> Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with attack angle 60° in service .....	36
<b>Fig. 29</b> Damage response behavior of CB1 container box & DS1 steel drum .....	40
<b>Fig. 30</b> Damage response behavior of CB3 container box & DC1 concrete drum .....	41
<b>Fig. 31</b> Damage response behavior of CB4 container box & DC2 concrete drum .....	43
<b>Fig. 32</b> Damage response behavior of CB6 container box & DC4 concrete drum .....	44
<b>Fig. 33</b> Damage response behavior of CB7 container box & DS1 steel drum .....	45
<b>Fig. 34</b> Grounding response behaviors in full loading condition with rock position center .....	50
<b>Fig. 35</b> Grounding response behaviors in full loading condition with rock position 3.0m off .....	52
<b>Fig. 36</b> Grounding response in full load condition with rock position center and 3.0m off .....	53

# **Structural Safety Assessment of Ship Collision and Grounding using FSI Analysis Technique**

Zhao, Tuo

Department of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



## **Abstract**

Structural safety assessment was performed for the collision and grounding scenarios of specialized ship and its cargo. To ensure reasonable and reliable safety assessment, realistic full-scale ship collision and grounding simulations were carried out, using FSI analysis technique of LS-DYNA code and propulsion force instead of velocity in simulations.

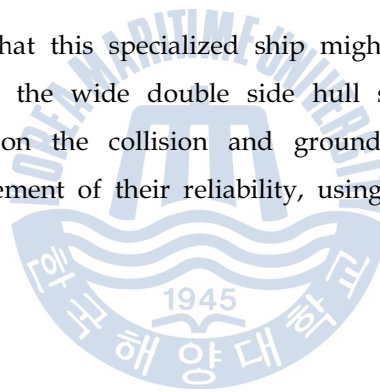
There was no fracture damage in the side inner side hull of DWT 2,600 ton specialized ship as struck ship, except DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition to struck one in service at 90 and 80 degree attack angles, and also no damage in the inner bottom hull of specialized ship as grounding one, even rock height 0.75m above inner bottom hull under full load condition.

Contrary to the void condition simulations, more realistic collision and grounding response behaviors could be found in the surrounding sea water, in that striking ship moved laterally before collision, and a lot of kinetic energy of large size of striking ship might be transferred to the fluid energy, which would give a reasonable collision speed response after collision in addition to the loss of

internal energy to the struck ship. Realistic grounding response behaviors of the grounding ship was also observed, such as jumping and sway around the rock under its self weight, depending on its load condition, rock height and position.

Through the full-scale collision simulation of cargo container boxes and drums loaded inside the cargo hold of struck ship using FSI analysis technique, it was found that their crashworthiness capacities and damage patterns could be relatively well figured out with their energy dissipations, and their structural safeties would be assessed with high reliability. Container boxes and drums in shell guide also contributed greatly to the crashworthiness of side structure of struck ship, and no damage occurred in the drums, except damage only in the bottom and side of square concrete drum with no damage in its inside even in the very serious collision scenario.

It could be confirmed that this specialized ship might be superior to the severe collision scenarios due to the wide double side hull space. In the future study, some verification works on the collision and grounding simulations should be performed for the enhancement of their reliability, using FSI analysis technique.





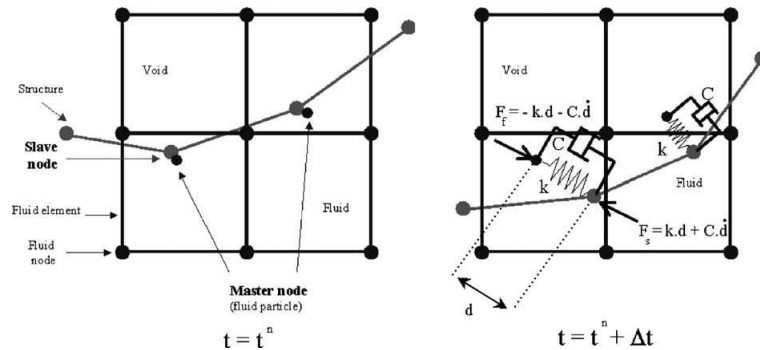
## 제1장 서론

본 연구에서는 위험 또는 고가 화물의 해상운반 중 운반선박(특수선)의 충돌 및 좌초사고로 야기되는 운반선박과 운반용기(운반화물 드럼 포함)에 미치는 손상 정도를 고도 정밀 비선형 동적해석 시뮬레이션 프로그램 LS-DYNA(LSTC 2011)를 사용한 실선(full-scale ship) 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 수행하여 정량적으로 분석하였다.

실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션은 LS-DYNA 코드의 유체-구조 연성(FSI; Fluid-Structure Interaction) 해석기법을 사용하여 선박을 부력에 의해 해수에 부양(floating)시키고 항해하는 선박을 추진력에 의해 항해하도록 시뮬레이션을 수행함으로써 일반적으로 무중력 진공(void) 상태에서의 선박 충돌 및 좌초 응답해석에 비하여 매우 실제적(realistic)이고 정확한(accurate) 내충격 구조 안전성 평가가 가능하다.

이러한 기법은 선박을 해수 중에 부양시킴으로써 무중력 진공 상태에서 피충돌선(struck ship)을 고정시키는 경우와는 달리 충돌선(striking ship)의 충돌에 대한 내충돌 응답이 실제 충돌사고 상황에 맞는 시뮬레이션이 가능하고, 충돌선과 좌초선박의 운항속도를 시뮬레이션 상에서 속도로 조정함으로써 실제 충돌 및 좌초에 따른 속도의 감소와 방향선회 등을 조정할 수 없는 점을 추진력을 선박 길이방향으로 가함으로써 충돌 및 좌초에 따른 속도 감소와 방향선회를 실제 상황에 맞게 구현 가능하게 하였다.

일반적으로 슬로싱(sloshing) 및 슬래밍(slamming) 등의 유체-구조 연성 해석은 LS-DYNA 코드의 Multi-Material ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 정식화와 Euler-Lagrange 연성 알고리즘(coupling algorithm)을 사용하는 이동격자 알고리즘(moving mesh algorithm)과 유체 격자를 구조물에 겹칠 수 있는 기능 등을 사용할 수 있어 매우 편리하게 수행할 수 있다. VOF(Volume Of Fluid) 기법 또한 다양한 비선형 자유수면 문제를 해석하는데 적합하고, Fig. 1과 같은 연성 알고리즘은 실선 선박의 충돌 및 좌초 문제의 유체-구조 연성해석에 적합하다(Aquelet et al. 2006, Souli et al. 2000).



**Fig. 1** Sketch of penalty coupling algorithm (Aquelet et al. 2006)

유체-구조 연성 해석기법을 구현하기 위해서는 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 구현할 수 있는 유체(해수 및 공기) 영역과 깊이(높이)가 필요하고, 충돌선(5척)과 특수선과의 해수와의 연성을 위한 모델링과 연성 파라미터들의 조정을 통한 해수에서의 부양 및 추진력을 구현하고, 특수선의 각 충돌선과의 충돌 및 좌초 시나리오에 따른 충돌선의 충돌 부위, 특수선의 피충돌 부위 및 좌초 부위의 상세(fine) 파손(fracture)에 적합한 모델링을 수행하였다.

충돌선과 특수선의 상세 파손모델은 강재의 파손기준과 충돌속도에 따른 변형률 의존 재료 물성치(strain rate material properties)를 구현하도록 하였고, 운반용기 8종과 7종의 운반물(2종의 철재 드럼 및 5종의 콘크리트 드럼)도 파손모델의 재료 물성치를 구현하였다.

운반용기 및 운반물의 구조 안전성 평가는 본 연구에서 수행한 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션의 결과 중 가장 손상이 크게 발생한 시나리오에 대하여 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션 다시 수행한 후 운반용기의 안전성 평가를 수행하였다. 운반용기는 선박에 비하여 매우 크기가 작으므로 운반용기의 성능을 충분히 발휘할 수 있는 있도록 정확한 파손모델의 재료 물성치 뿐만 아니라 상세하게 모델링하였다.

본 연구를 효율적으로 정리하기 위하여 2장에서는 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션에 사용되었던 충돌선 및 좌초선의 종류, 강재의 파단기준 및 재료 물성치, 충돌 및 좌초의 선박 및 운반물을 포함한 운반용기의 모델링, 충돌 및 좌초 시나리오 등을 자세히 설명하였다.

3장은 5척의 충돌선이 경하 및 만재상태에서 각각 최대설계속력으로 정지된 만재상

태의 피충돌선에 수직으로, 그리고 최대설계속력으로 운항중인 만재상태의 피충돌선과 수직 및 예각( $80^{\circ} \sim 60^{\circ}$ )으로 충돌하는 시나리오에 대한 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하고 구조 안전성을 평가하였다.

4장은 8종의 운반용기와 7종의 운반물에 대한 내충돌 안전성 평가를 위해 경하상태의 35,000톤 유조선이 최대설계속력으로 만재상태의 피충돌선에 예각  $80^{\circ}$ 로 충돌한 충돌 시나리오에 대하여 운반용기를 4번째 화물창의 shell guide에 적재하고 만재상태에서의 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

5장은 최대설계속력으로 운항중인 좌초선박 특수선이 만재상태로 선저로부터 2.0m 위로 올라와 있는 암초가 선체 중앙과 중앙에서 3.0m의 선측에 있는 경우에 충돌하는 실선 좌초 시뮬레이션을 수행하여 구조 안전성을 평가하였다.

마지막으로 6장은 본 논문의 결론부로서 연구결과를 종합적으로 분석하였다.



## 제2장 충돌 및 좌초 시나리오와 모델링

Table 1과 같이 톤수에 따라 5가지 종류의 충돌선을 고려하였고 만재 및 경하상태에서의 충돌선 선수부가 최대설계속도(max. design speed)로 정지 또는 최대설계속력으로 운항중인 만재상태의 피충돌선 선측을 충돌하는 시나리오로 실선 충돌 시물레이션을 수행하였다. 특수선과 더불어 Table 2에서와 같이 8종 운반용기(CB1~CB8)와 2종의 철재 드럼(DS1~DS2) 및 5종의 콘크리트 드럼(DC1~DC5)의 운반물에 대한 13가지 적재 경우를 고려하였다.

**Table 1** Principal particular of striking and struck(grounding) ships (unit: ton, m)

DWT	type	max. design speed	LOA	LBP	Breadth	Depth	Draft
500	Coastal fishing vessel	13.2	56.07	49.6	8.8	3.84	3.45
1,000	Deep sea fishing vessel	15.0	70.57	60.6	12.3	5.00	4.50
3,700	General cargo ship	15.0	102.70	93.0	14.0	7.00	5.20
10,500	Oil product tanker	15.0	115.00	107.0	18.2	10.70	8.15
35,000	Oil tanker	14.0	182.00	174.5	27.4	17.60	9.80
2,600	Specialized ship	12.0	78.60	71.0	15.8	7.30	4.00

**Table 2** Type and number of container boxes and drums

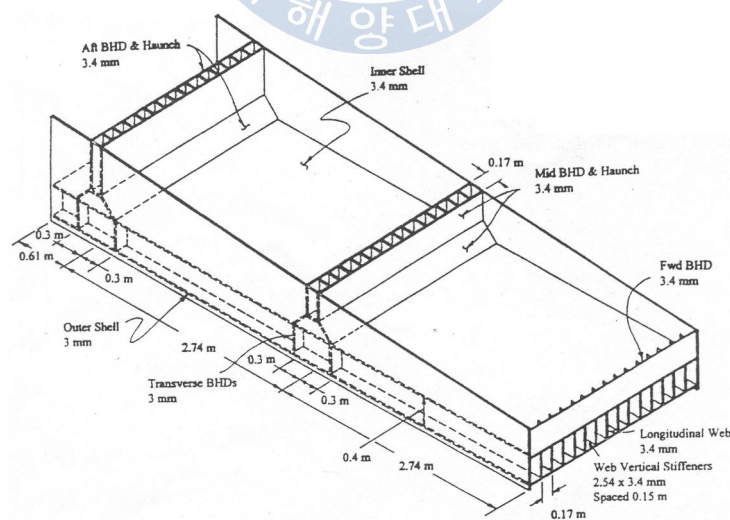
container box type	drum type	number
CB1	DS1 steel	1
CB2	DS2 concrete	1
CB3	DC1 concrete	1
CB4	DC2 concrete	1
CB4	DC3 & DC4 concrete	2
CB5	DS1 & DS2 steel	2
CB6	DC4 & DC5 concrete	2
CB7	DS1 & DS2 steel	2
CB8	DC5 concrete	1
8 type	7 type	13

피충돌선이 정지된 경우에는 충돌각도 수직만을 고려하였고, 운항중일 경우에는 충돌각도 수직 및 예각( $80^{\circ} \sim 60^{\circ}$ )으로 충돌하는 시나리오를 고려하였다. 최대설계속력으로 운항중인 특수선이 만재상태로 선체 중앙과 중앙에서 3.0m의 선측에 있는 압초와 충돌하는 실선 좌초 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 압초는 선저로부터 2.00m 위로 올라와 있는 경우를 고려하였다.

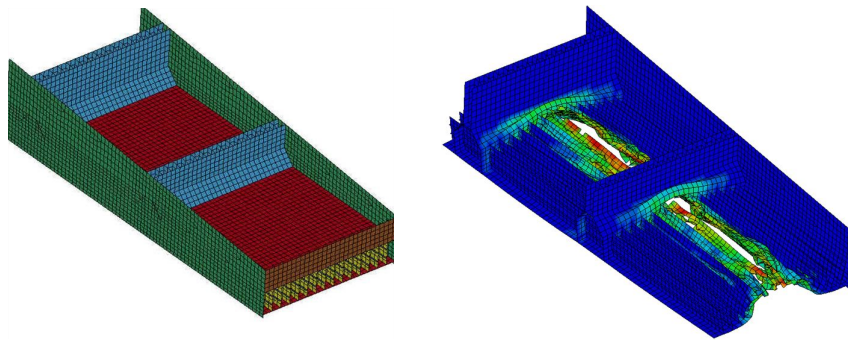
## 2.1 재료의 파단기준

고도 정밀 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 위해서는 선박 및 운반용기 등의 재료의 파단기준(fracture or rupture criterion)을 유한요소 모델링과 실험 및 실측 결과와의 검증을 통하여 추정하는 것이 바람직하다.

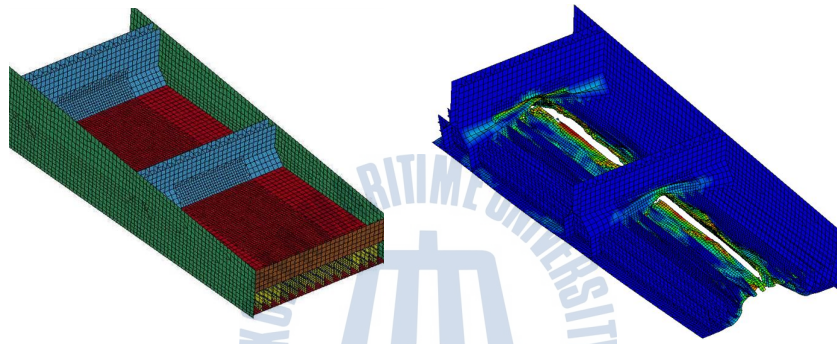
일반적으로 NSWC에서 수행한 Fig. 2와 같은 1:5 축적 이중저 유조선 모델의 좌초 실험을 이용하여 유한요소 시뮬레이션의 수행 능력을 검증하고 강재의 파단기준을 설정한다. Fig. 3과 같은 실험 모델 ADH/PD328V의 유한요소 상세모델(fine model)과 거친모델(rough model)을 이용하여 파단 변형률(failure strain) 0.20~0.35에 따른 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교 검토하였다. Table 3과 같이 ASTM 569 강재 물성치에 변형률 의존 재료 물성치(strain rate material properties)를 사용하였고 응력-변형률 관계는 Fig. 4와 같다.



**Fig. 2** Grounding test double hull model ADH/PD328V of NSWC (Rodd and Sikora 1995)



(a) rough model and simulation

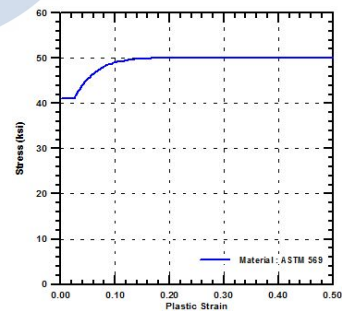


(b) fine model and simulation

**Fig. 3** Grounding test model and simulation of ADH/PD328V model (Lee 2007)

**Table 3** Material properties of ASTM 569

Property	ASTM 569
Young's modulus	$3.00 \times 10^7$ ksi
Density	$7.43 \times 10^{-4}$ lbf · s/in <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.30
Yield stress	41.00 ksi
Ultimate stress	50.00 ksi
Failure strain	0.20, 0.25, 0.30, 0.35
Dynamic yield stress constants	$D=40.4 \text{ s}^{-1}$ , $q=5$

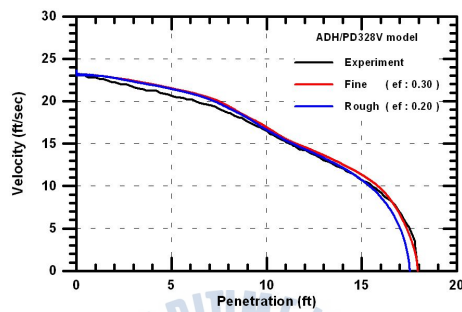


**Fig. 4** Stress-strain curve of ASTM 569

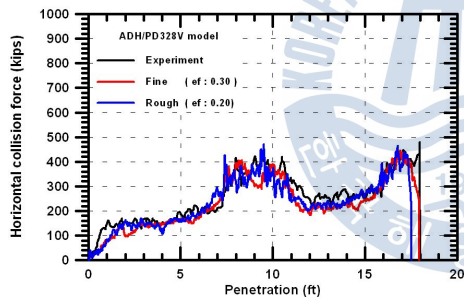
Fig. 5에서와 같이 강재의 파손기준 파단변형률은 유한요소 크기(요소길이/두께)에 의해 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 선박과 강재 운반용기(운반물 포함)는 Fig. 6에서와 같이 동적효과(strain rate effect)를 고려하기 위하여 연강(mild steel)과 고장력강(high tensile steel)의 재료 물성치를 Table 4에서와 같이 Cowper-Symonds



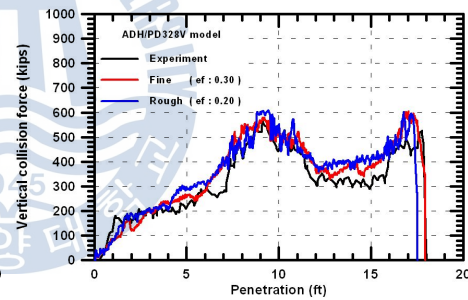
변형률 의존 재료와 파단 변형률을 고려하여 충돌에 의한 파단을 발생시킬 수 있게 하였고, Fig. 7과 같은 재료의 응력-변형률 곡선을 사용하였다. 콘크리트의 파손모델과 고무재료는 LS-DYNA code의 MAT\_CSCM\_CONCRETE (MAT\_159)와 MAT\_MOONEY\_RIVLIN\_RUBBER(MAT\_027)를 사용하였고, 콘크리트 철근은 SD400 6φ 모델을 채용하였다.



(a) velocity response



(b) horizontal force response

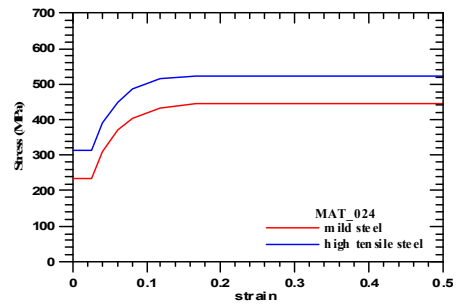
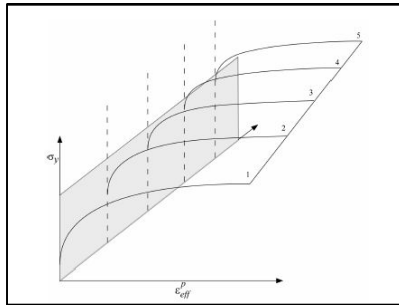


(c) vertical force response

**Fig. 5** Comparison of simulation responses to grounding test results of ADH/PD328V (Lee 2007)

**Table 4** Material properties of mild and high tensile steels

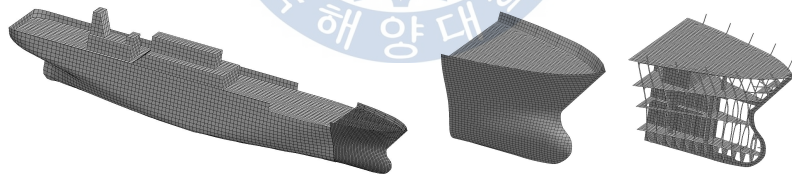
Property	Mild steel	High tensile steel
Young's modulus	206.0 GPa	206 GPa
Density	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Yield stress	235.0 MPa	315.0 MPa
Ultimate stress	445.0 MPa	525.0 MPa
Failure strain	0.2	0.2
Dynamic yield stress constants	$D=40.4 \text{ s}^{-1}$ , $q=5$	$D=24,805.6 \text{ s}^{-1}$ , $q=5$



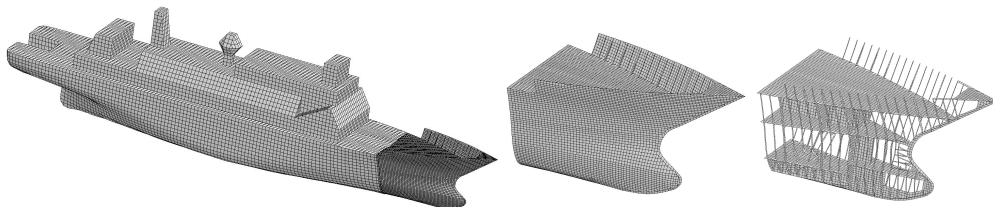
**Fig. 6** Strain rate effect **Fig. 7** Stress-strain curve of mild & high tensile steel

## 2.2 충돌 및 좌초 모델

충돌선 5척과 피충돌선 및 좌초선박의 유한요소 모델은 Fig. 8과 같다. Figs. 8(a)~(e), 8(f) 및 8(g)는 각각 충돌선, 피충돌선 및 좌초선의 모델을 보여주고 있다. 각 경우 첫 번째는 선박전체 유한요소 모델을, 두 번째는 외판을 포함한 선수부 및 선체 중앙부 화물창, 선저외판을 포함한 선체 선저부 모델을, 세 번째는 외판을 제거한 선수부 및 선체 중앙부 화물창, 선저외판을 제거한 선체 선저부 모델을 보여주고 있다. 100mm 이하의 치수를 갖는 보강재(frame)를 beam 요소로 모델링을 제외하고는 모두 shell 요소로 모델링하였다.

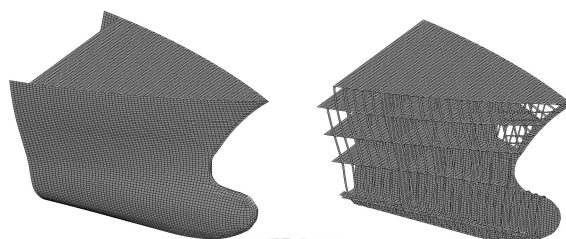
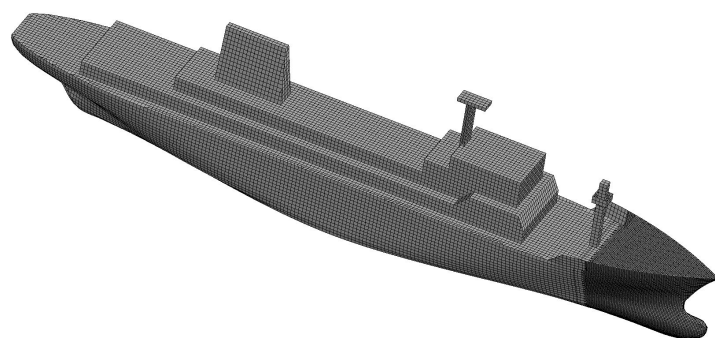


(a) collision ship DWT 500 ton coastal fishing vessel

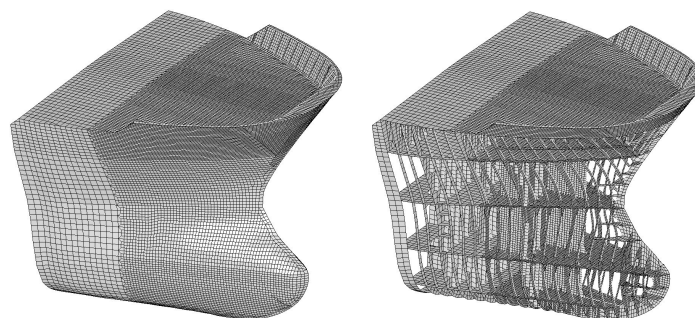
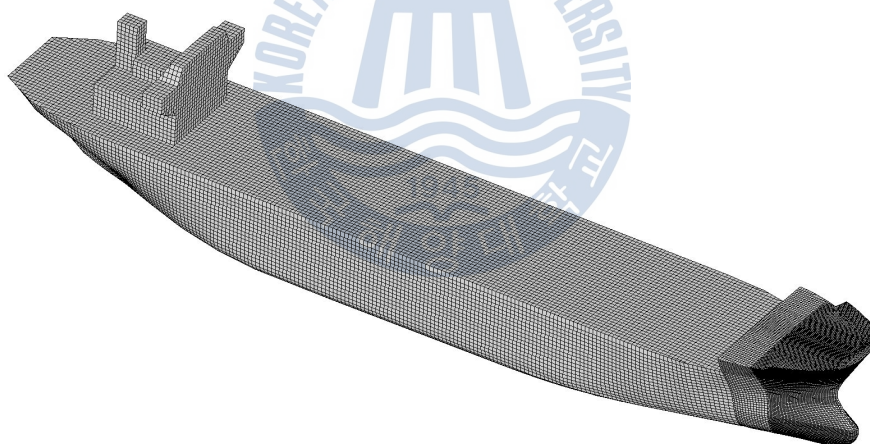


(b) collision ship DWT 1,000 ton deep sea fishing vessel

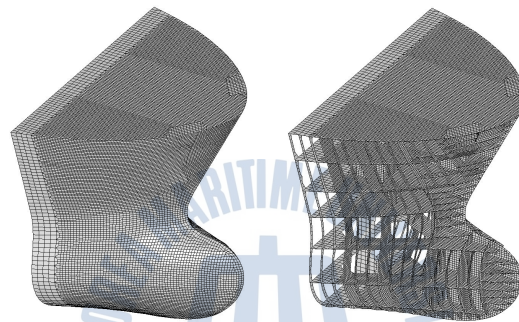
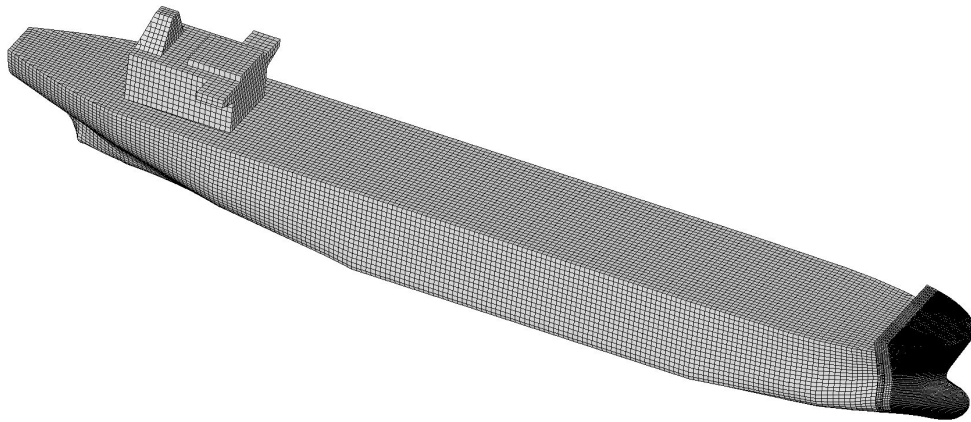




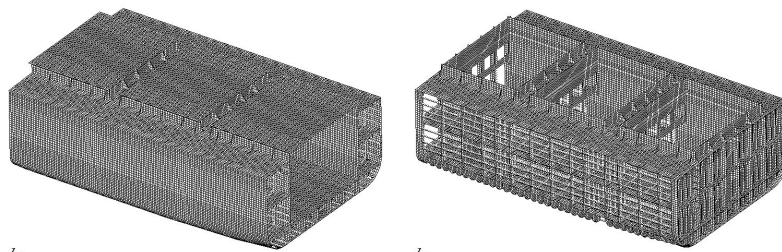
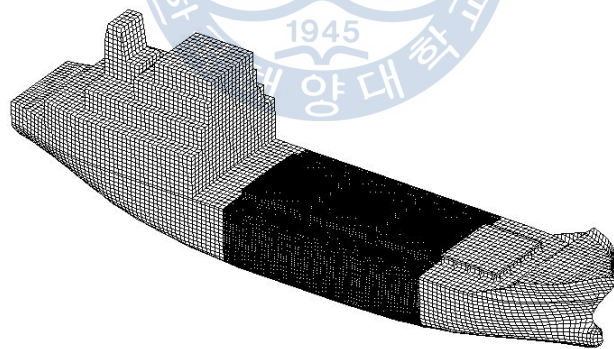
(c) collision ship DWT 3,700 ton general cargo ship



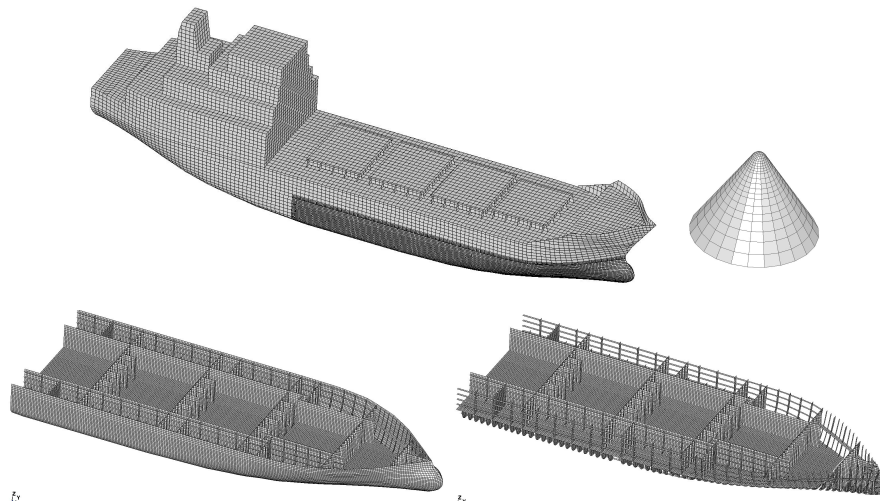
(d) collision ship DWT 10,500 ton oil product tanker



(e) collision ship DWT 35,000 ton oil tanker



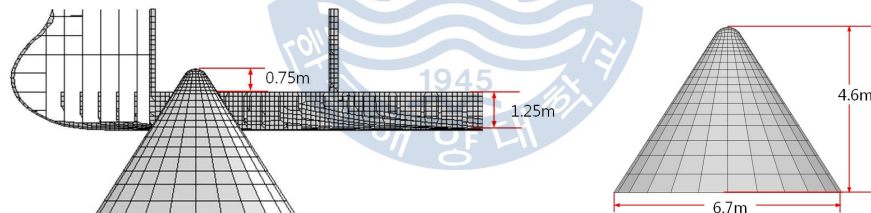
(f) struck ship DWT 2,600 ton specialized ship



(g) grounding ship DWT 2,600 ton specialized ship

**Fig. 8** Full-scale ship collision and grounding simulation models

Fig. 9는 좌초 시나리오와 모델에 대하여 보다 자세하게 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 암초 높이를, Fig. 9(b)는 암초 형상과 제원에 대하여 보여주고 있다.



(a) rock height

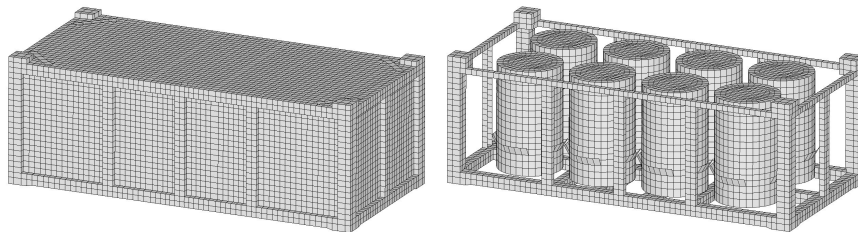
(b) rock configuration and dimension

**Fig. 9** Grounding scenario and model

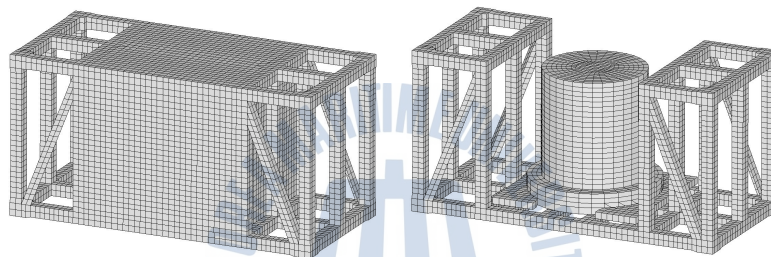
Table 2에서 설명한 8종의 운반용기와 7종의 운반물(2종의 철재 드럼 및 5종의 콘크리트 드럼)의 13가지 조합 중 본 논문에서는 5종의 운반용기(CB1, CB3, CB4, CB6, CB7)에 4가지 운반물(DS1, DC1, DC2, DC4)을 적재한 5가지 조합의 유한요소 모델을 Fig. 10에 나타내었다. 각 유한요소 모델의 첫 번째는 운반용기 전체 모델을, 두 번째는 운반용기 외관을 제거한 운반용기 및 운반물 드럼의 모델을 보여주고 있다. 운반물 드럼에 대한 상세한 모델링은 Fig. 11에 나타내었다. 강재 드럼인 경우 뚜껑과 바닥의 프레임과 중간 보강을 위한 주름(fold)은 beam을 사용하여 Fig. 11(a)에서와 같이 보강시켰고, Fig. 11(b)~(d)에서와 같이 콘크리트 드럼인 경우 철근으로 보강시켰다.



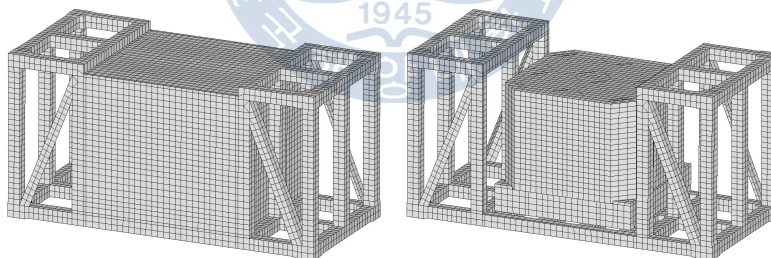
운반용기의 철판 두께가 30.0mm 이상인 경우 solid 요소를 사용하였고, 그 이하는 shell 요소로 모델링하였다.



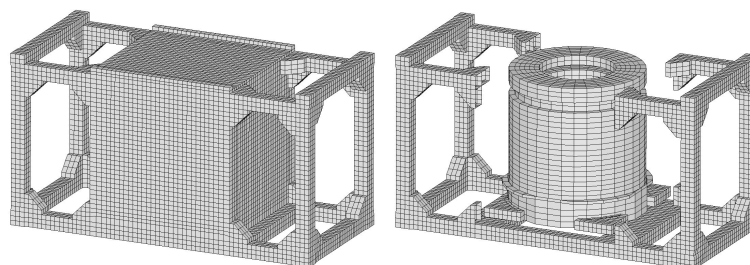
(a) CB1 container box & DS1 steel drum



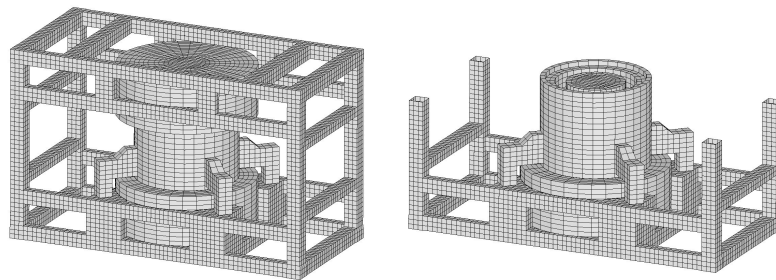
(b) CB3 container box & DC1 concrete drum



(c) CB4 container box & DC2 concrete drum

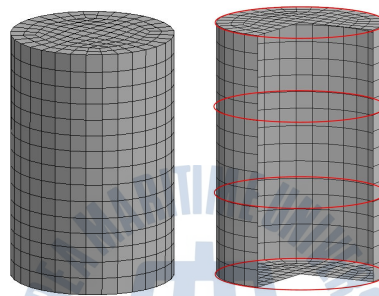


(d) CB6 container box & DC4 concrete drum

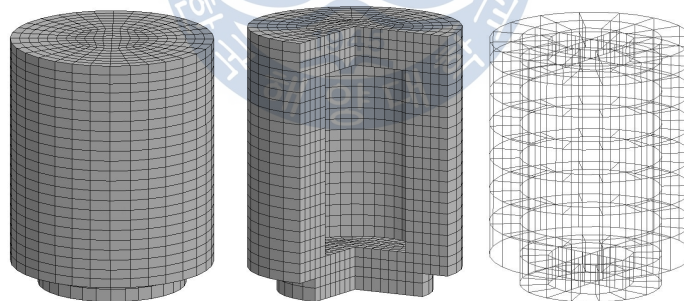


(e) CB7 container box & DS1 steel drum

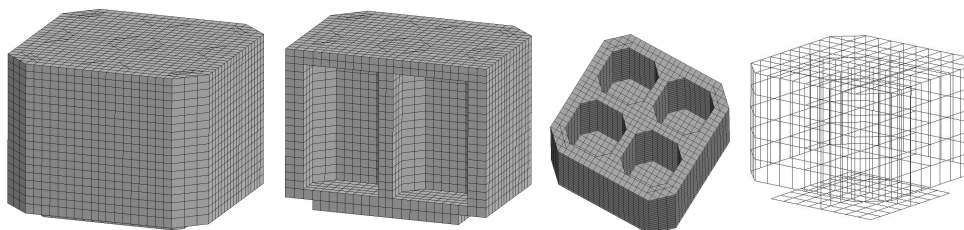
**Fig. 10** F.E. configuration of container boxes and drums



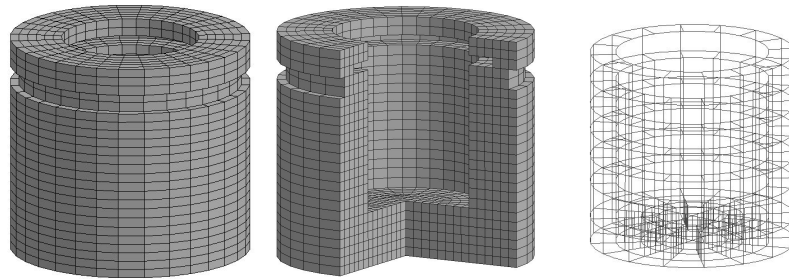
(a) DS 1 steel drum



(b) DC1 concrete drum



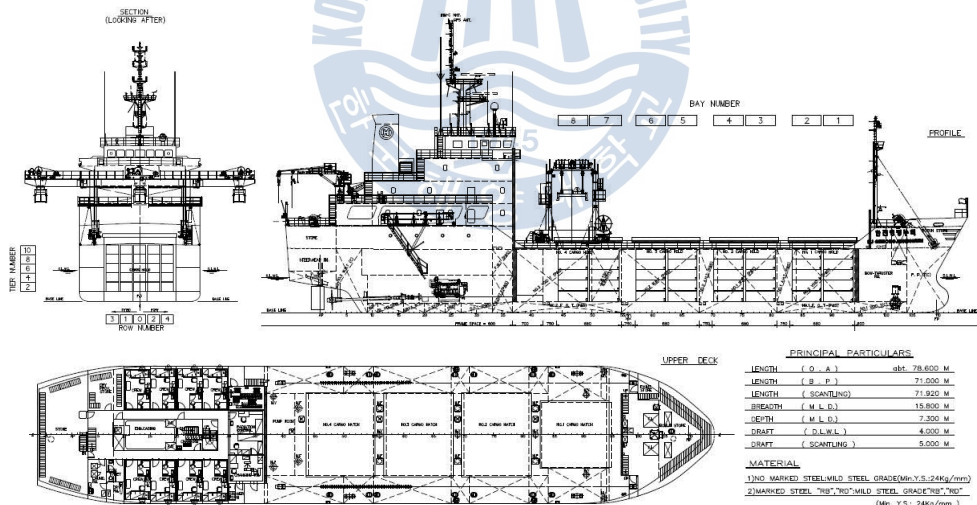
(c) DC2 concrete drum



(d) DC4 concrete drum

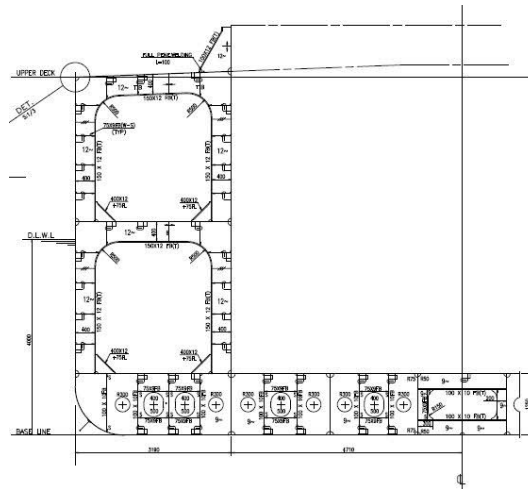
**Fig. 11** F.E. configuration of drums

Fig. 12는 특수선의 일반전개도와 제원을 보여주고 있다. Fig. 13의 중앙횡단면에서 알 수 있듯이 도면을 특수선의 이중저 높이는 1.25m로서 일반적인 선박과 비슷하지만 선측 탱크 폭은 3.19m로서 매우 넓은 편이다. 화물창 내 정규 운반용기 용 shell guide 유한요소 모델과 화물창 내 운반용기를 탑재한 경우의 모델을 Fig. 14에 보여 주고 있다.

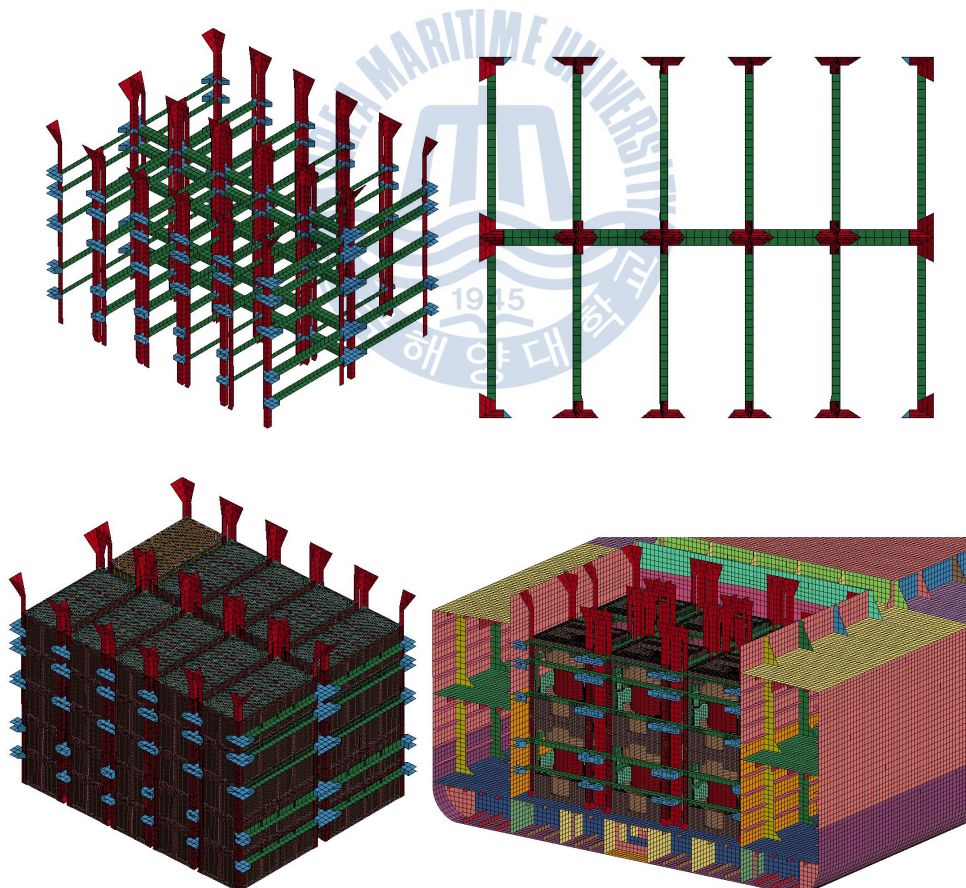


**Fig. 12** General arrangement and principal particulars of specialized ship





**Fig. 13** Midship section of specialized ship

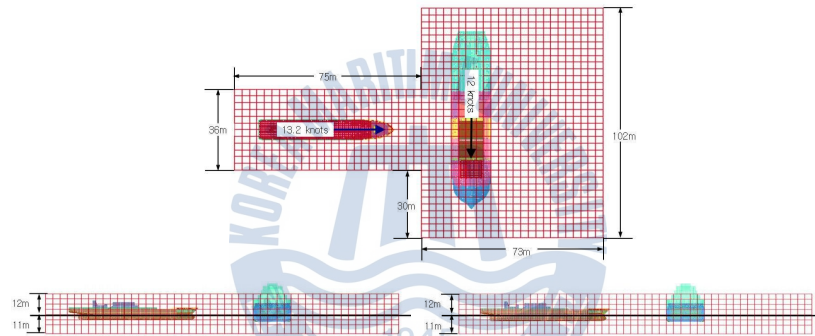


**Fig. 14** F.E. configuration of shell guide with container boxes in cargo hold

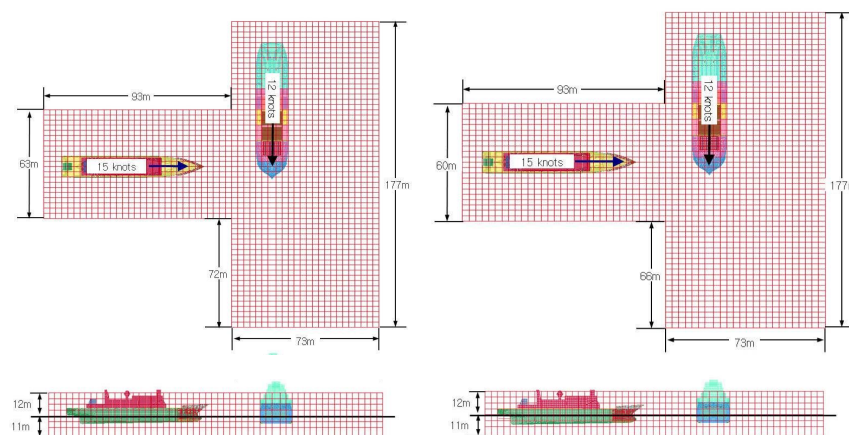
## 2.3 충돌 및 좌초 시나리오

앞에서 충돌 및 좌초에 대한 전반적인 시나리오를 언급한 것을 여기서는 보다 구체적으로 경우에 따른 선박과 유체(공기와 해수) 사이의 위치를 나타내었다. 본 연구에서 고려중인 유체-구조 연성 해석기법은 해석시간이 매우 크기 때문에 유동해석에 필요한 부분만 모델링 하였다.

실선 충돌 시나리오는 5척의 충돌선이 경하 및 만재상태에서 각각 최대설계속력으로 정지된 만재상태의 피충돌선에 수직으로, 최대설계속력으로 운항중인 만재상태의 피충돌선과 수직 및 예각( $80^{\circ} \sim 60^{\circ}$ )으로 충돌하는 경우들이다. 여기서는 각 충돌선에 대하여 대표적으로 1개의 시나리오를 Figs. 15~19에 나타내었다.

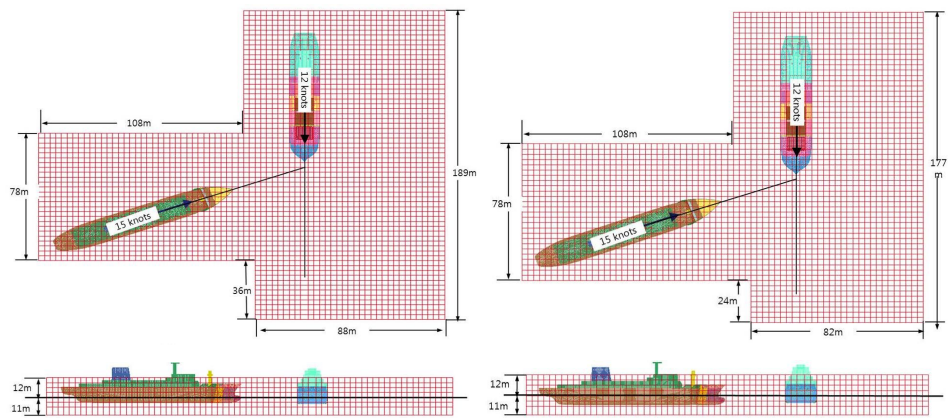


**Fig. 15** Collision scenario of DWT 500 ton striking ship in ballast and full loading conditions with perpendicular in standstill

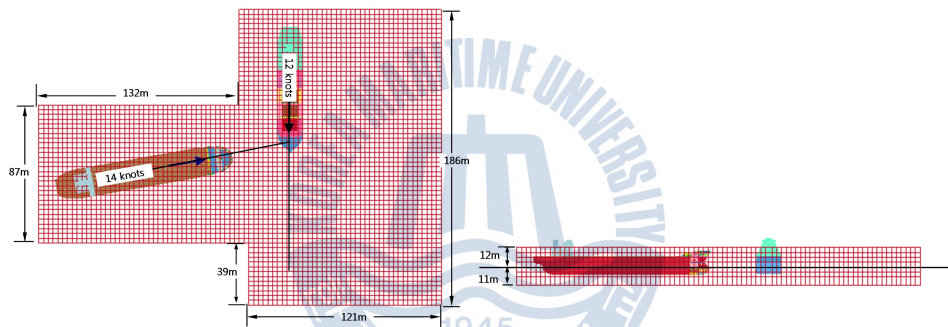


**Fig. 16** Collision scenario of DWT 1,000 ton striking ship in ballast and full loading conditions with perpendicular in service

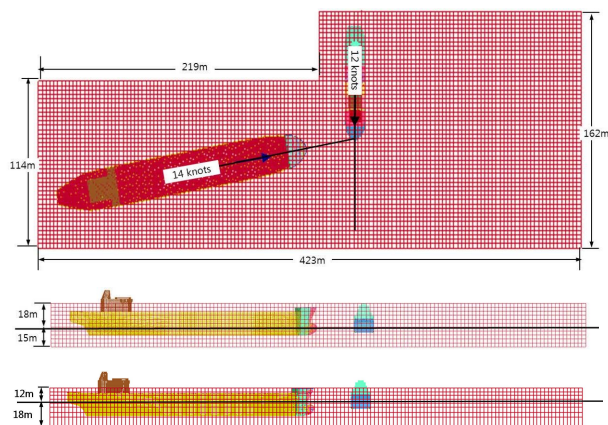




**Fig. 17** Collision scenario of DWT 3,700 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 70 degree in service

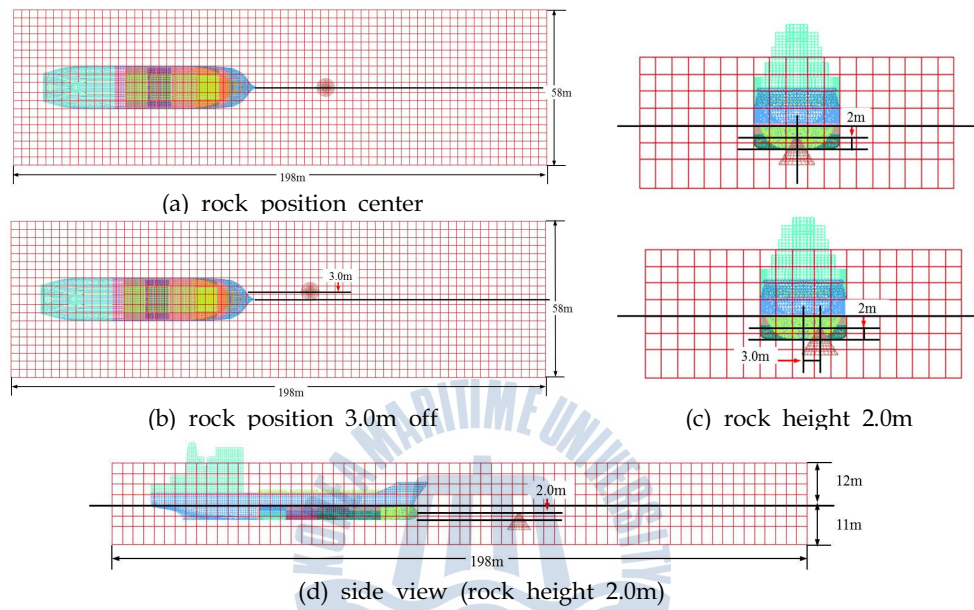


**Fig. 18** Collision scenario of DWT 10,500 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 80 degree in service



**Fig. 19** Collision scenario of DWT 35,000 ton striking ship in ballast and full loading conditions with 80 degree in service

실선 좌초 시나리오도 최대설계속력으로 운항중인 특수선이 만재상태로 선체 중앙과 중앙에서 3.0m의 선측에 있는 암초에 좌초하는 경우들로서, Fig. 20에서와 같이 암초는 선저로부터 2.00m 위로 올라와 있는 경우를 고려하였다.



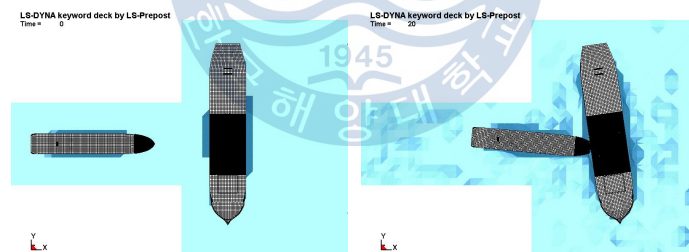
**Fig. 20** Grounding scenario of specialized ship in full load condition

### 제3장 실선 충돌 시뮬레이션을 통한 구조 안전성 평가

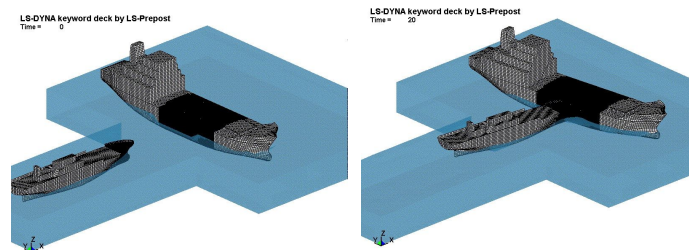
Figs. 15~19에서와 같이 충돌선 DWT 500~35,000톤의 5가지 충돌 시나리오에 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 실선 충돌 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 500톤 연안대형어선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과

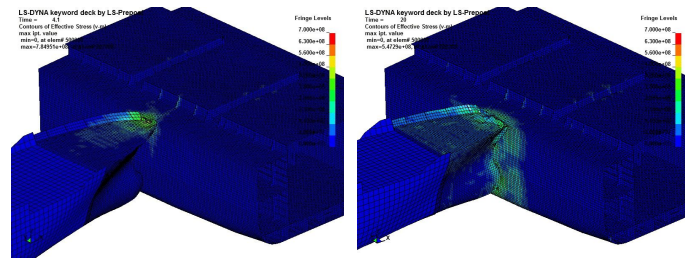
500톤 연안대형어선 충돌선이 경하상태와 만재상태에서 최대설계속력(13.2 노트)으로 정지중인 만재상태의 피충돌선을 수직으로 충돌하는 경우와 최대설계속력(12.0 노트)로 운항중인 피충돌선에 수직 및 예각(80°, 70°)로 충돌하는 시나리오에 따른 실선 충돌 시뮬레이션 결과 중 충돌선 500톤 만재상태에서 정지된 만재상태 피충돌선에 수직으로 충돌하는 경우에 대한 결과를 Fig. 21에 나타내었다.



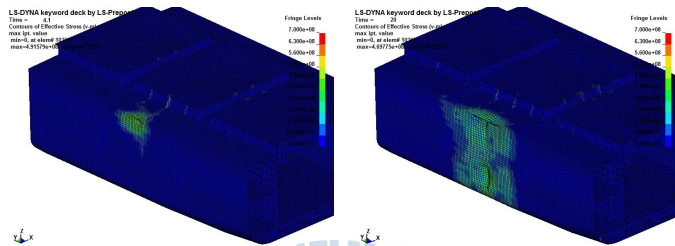
(a) overall plane view



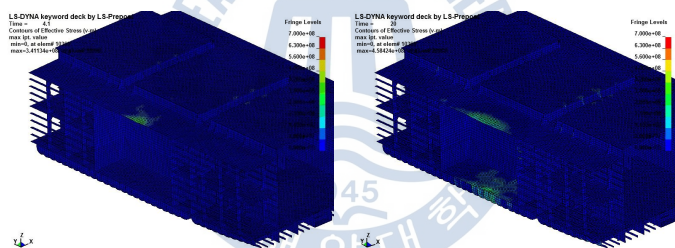
(b) overall iso view



(c) damage configuration of side hull and struck ship



(d) damage configuration of side hull of striking ship



(e) damage configuration of side inner hull of striking ship

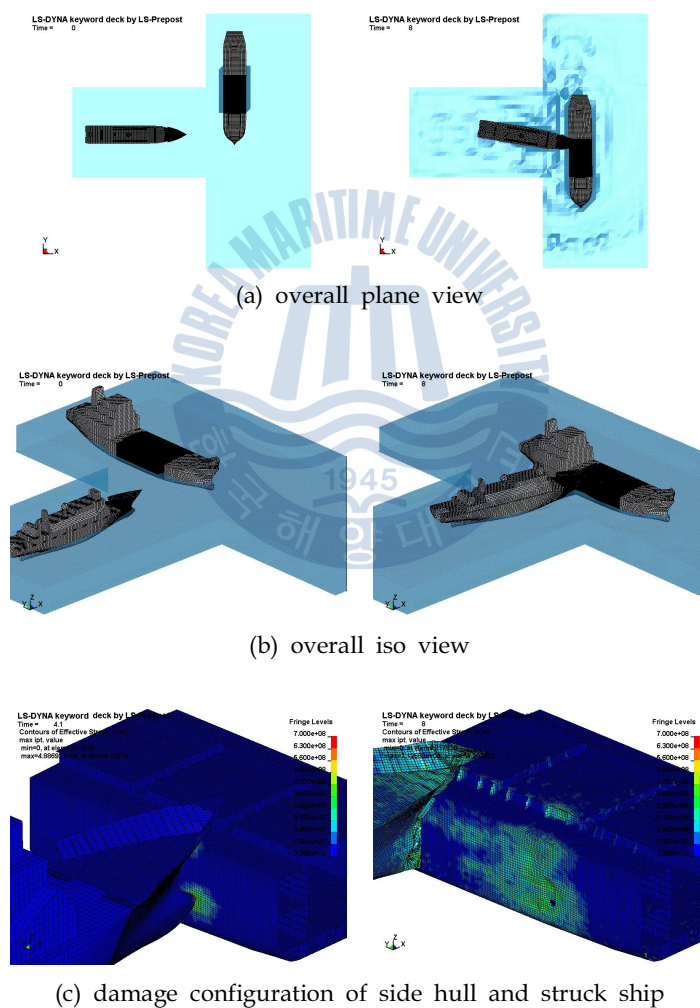
**Fig. 21** Collision response behavior of DWT 500 ton striking ship in full loading condition with perpendicular in stationary

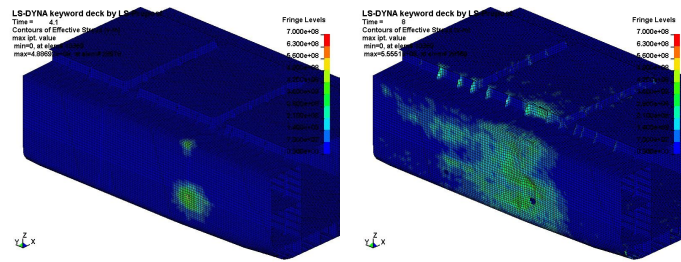
예상하였던 대로 피충돌선에 비하여 상대적으로 작은 충돌선이 충돌하여 정지 또는 운항중인 어떠한 경우에도 피충돌선의 선측에 큰 손상을 주지 못하고 있음을 알 수 있다. 선측외판에 약간의 dent가 발생하였고 경하상태의 충돌선이 예각으로 충돌하는 경우 피충돌선의 선측외판에 작은 크기의 파공을 발생시키는 것을 볼 수 있다. 이것은 만재상태에서는 충돌선 구상선수부(bulbous bow)가 피충돌선 선저내판 근처의 선측에 충돌하기 때문으로 사료된다.



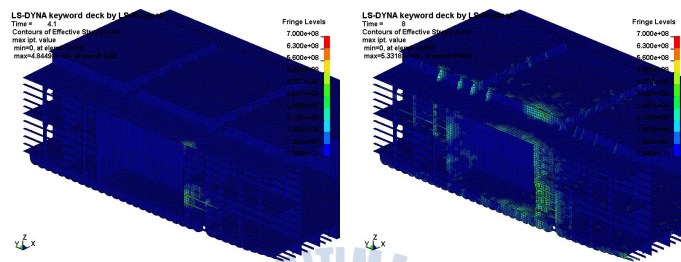
### 3.2 1,000톤 원양어선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과

1,000톤 원양어선의 충돌선이 경하상태와 만재상태에서 최대설계속력(15.0 노트)으로 정지중인 만재상태 피충돌선 특수선을 수직으로 충돌하는 경우와 최대설계속력(12.0 노트)으로 운항중인 피충돌선에 수직 및 예각(80°, 70°)로 충돌하는 시나리오에 따른 실선 충돌 시뮬레이션 결과 중 충돌선 1,000톤 만재상태에서 운항중인 만재상태 피충돌선에 수직으로 충돌하는 경우에 대한 결과를 Fig. 22에 나타내었다.





(d) damage configuration of side hull of striking ship



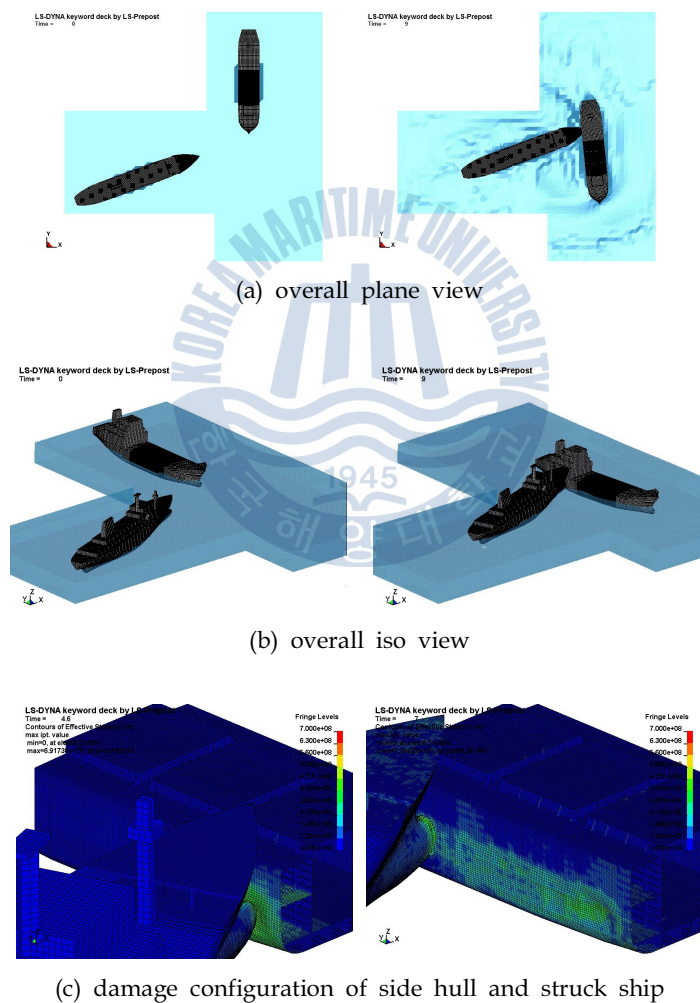
(e) damage configuration of side inner hull of striking ship

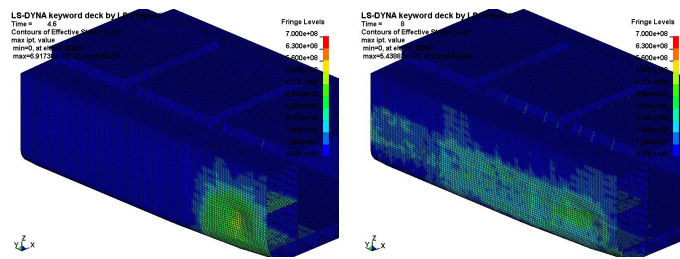
**Fig. 22** Collision response behavior of DWT 1,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in service

500톤 충돌선 보다는 약간 더 큰 충돌선이므로 정지중인 피충돌선에 수직으로 충돌하는 경우 피충돌선의 선측외판에 충돌선의 구상선수부가 삽입되어 선측외판에 파공을 발생시키는 것을 알 수 있다. 그러나 피충돌선이 운항 중일 경우 경하상태로 수직으로 충돌선이 충돌하는 경우와 경하와 만재상태에의 충돌선과 70°로 충돌하는 경우에 선측외판에 파공이 발생하는 것을 알 수 있다. 충돌선의 구상선수부와 피충돌선의 선저내판과의 위치에 따라 경하상태의 피충돌선의 충돌에 의해 다소 더 큰 파공이 발생하고 있다. 어떠한 충돌 시나리오에 대해서도 선측내판의 손상은 발생하지 않았다.

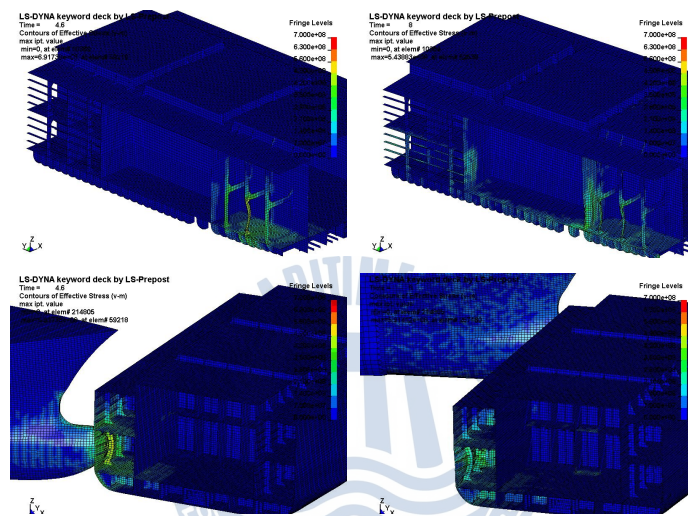
### 3.3 3,700톤 일반화물선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과

3,700톤 일반화물선 충돌선이 경하상태와 만재상태에서 최대설계속력(15.0 노트)으로 만재상태로 정지중인 피충돌선을 수직으로 충돌하는 경우와 최대설계속력(12.0 노트)으로 운항중인 피충돌선을 수직 및 예각(80°, 70°)로 충돌하는 시나리오의 실선 충돌 시뮬레이션 결과 중 충돌선 1,000톤 경하상태에서 운항중인 만재상태 피충돌선에 예각(70°)으로 충돌하는 경우에 대한 결과를 Fig. 23에 나타내었다.





(d) damage configuration of side hull of striking ship



(f) damage configuration of side inner hull of striking ship

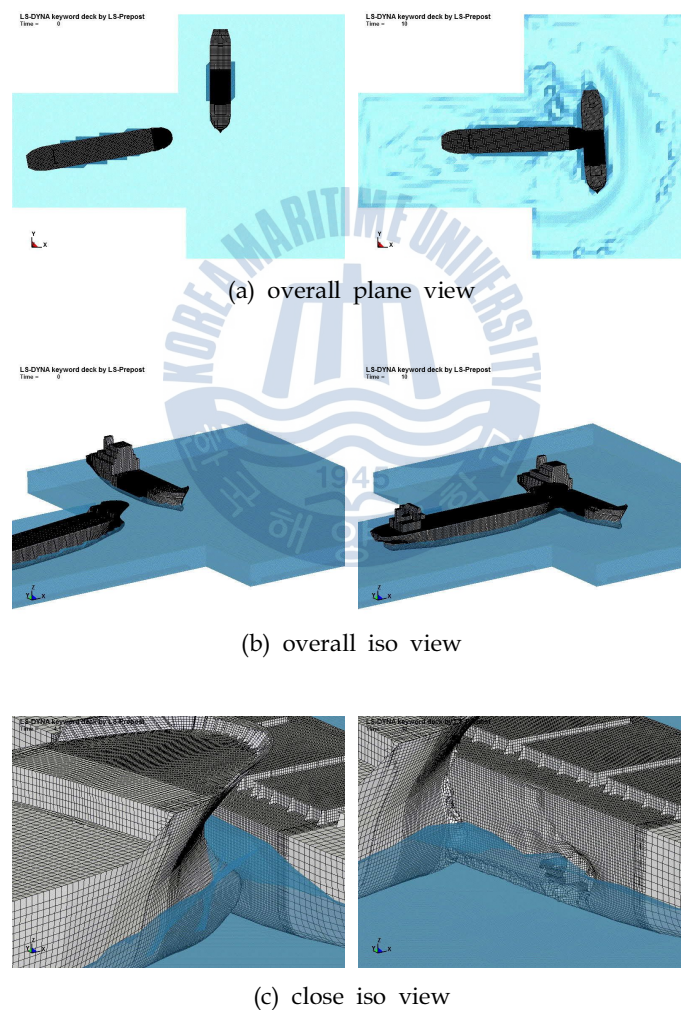
**Fig. 23** Collision response behavior of DWT 3,700 ton striking ship in ballast condition with attack angle 70° in service

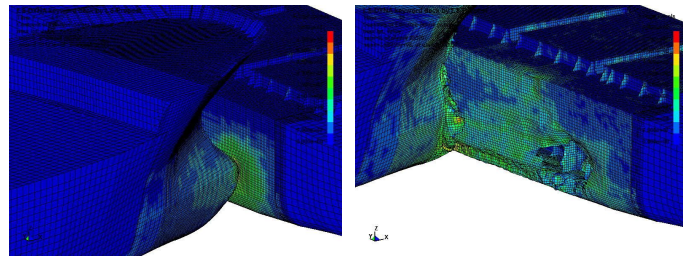
1,000톤 충돌선 보다 훨씬 크고, 피충돌선에 비하여도 큰 충돌선이 경하 및 만재상태에서 정지 또는 운항중인 만재상태의 피충돌선에 수직이나 예각으로 충돌하여도 피충돌선의 선측에는 큰 파손이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 정지중인 피충돌선에 수직으로 충돌하는 경우가 운항중인 경우보다 선측외판에 조금 더 dent가 발생하고 약간의 파공이 발생하였다. 경하 및 만재상태에 따른 충돌선 구상선수부의 피충돌선 선측의 상대적인 위치에 따라 손상의 형상이 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 어떠한 충돌 시나리오에 대해서도 선측내판에는 손상이 발생하지 않았다. 충돌선의 구상선수부가 1,000톤의 충돌선에 비하여 다소 유연한 구조로 인하여 충돌에 따른 손상이 크기에 비하여 다소 작게 발생하였다는 것을 알 수 있다.



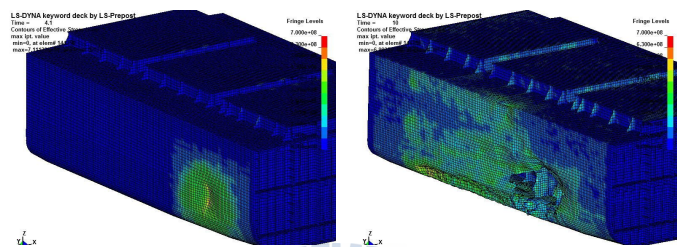
### 3.4 10,500톤 석유제품운반선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과

최대설계속력(15.0 노트)으로 운항중인 충돌선 DWT 10,500톤 석유제품운반선이 만재상태에서 정지된 피충돌선이 만재상태에서 수직으로 충돌하는 경우와 최대설계속력(12.0 노트)으로 운항중인 피충돌선에 수직 및 예각(80°, 75°)로 실선 충돌하는 시나리오에 시뮬레이션 결과 중 충돌선 10,500톤 경하상태에서 운항중인 만재상태 피충돌선에 예각(80°)으로 충돌하는 경우에 대한 결과를 Fig. 24에 나타내었다.

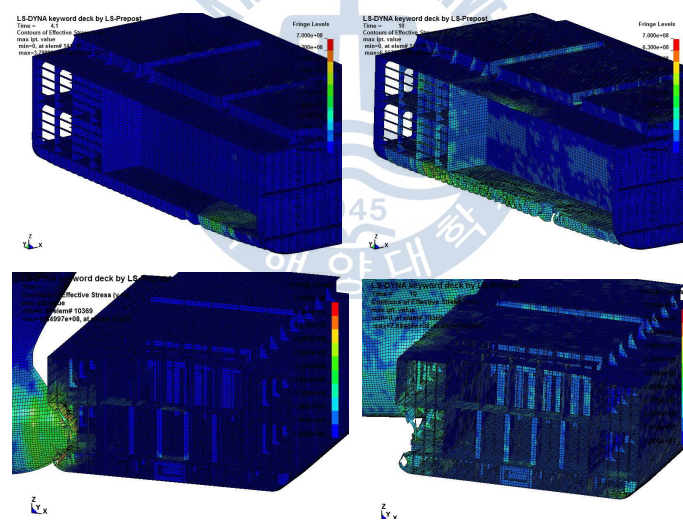




(d) damage configuration of side hull and struck ship



(e) damage configuration of side hull of striking ship



(f) damage configuration of side inner hull of striking ship

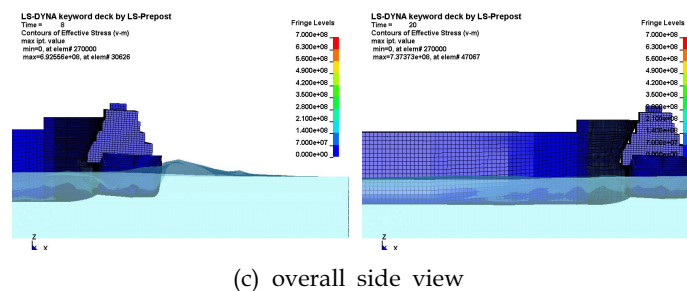
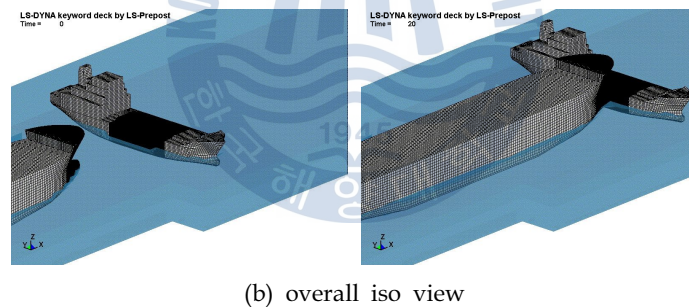
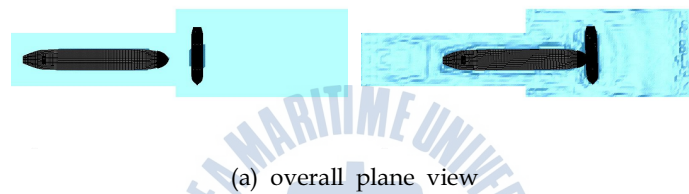
**Fig. 24** Collision response behavior of DWT 10,500 ton striking ship in ballast condition with attack angle  $80^\circ$  in service

피충돌선에 비하여도 배수량이 훨씬 큰 경하 및 만재상태에서의 충돌선이 정지되거나 운항중인 피충돌선에 수직을 충돌하여도 피충돌선의 선측내판에는 어떠한 파손도 발생하지 않았다는 것을 발견할 수 있다. 피충돌선이 정지해 있을 경우가 운항 중일 경우 보다 선측 외판의 파공이 훨씬 컸고, 경하상태에서의 충돌선이 더 큰 손상을 주었다. 이것은 충돌선의 구상선수부가 경하상태일 때 피충돌선의 선측구조에 충돌할 수 있었기 때문이고, 만재상태일 경우에는 피충돌선의 bilge 부위가 충돌선의 구상선수부 위에 놓였기 때문이다. 경하상태에서의 충돌선이 운항중인 피충돌선과 예각(75°)로 충돌할 경우에는 피충돌선의 선측에 파공을 발생시켰지만 여전히 선측내판에는 어떠한 손상도 발생하지 않았다. 역시 경하상태에서의 피충돌선이 운항중인 피충돌선과 예각(80°)으로 충돌하는 경우가 가장 큰 손상을 주었지만 역시 피충돌선의 선측내판에는 어떠한 손상도 발생시키지 않았다.

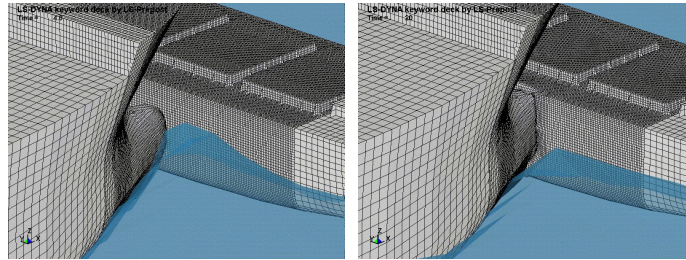


### 3.5 35,000톤 유조선 충돌선의 충돌 시뮬레이션 결과

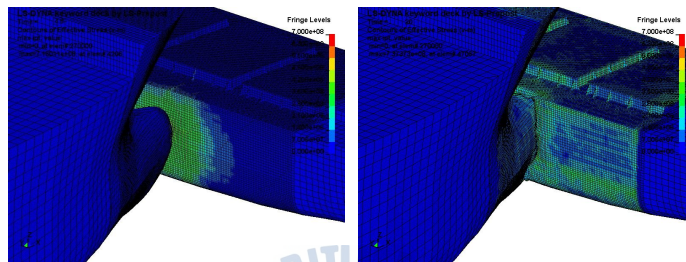
최대설계속력(14.0 노트)으로 운항중인 충돌선 DWT 35,000톤 유조선이 경하 및 만재에서 정지된 만재상태의 피충돌선에 수직으로 충돌하는 경우와 최대설계속력(12.0 노트)으로 운항중인 피충돌선에 수직 및 예각(80°, 60°)로 실선 충돌하는 시나리오의 시뮬레이션 결과 중 경하상태의 충돌선이 정지 또는 운항중인 피충돌선에 수직으로, 예각(80° 및 60°)으로 충돌하는 경우의 결과를 Figs. 25~28에 나타내었다. 예각 80°로 충돌하는 경우 충돌선과 피충돌선의 충돌 응답 중 피충돌선의 횡방향 선속(lateral velocity), 운동 및 내부 에너지 등을 Fig. 27(h) 및 (i)에 나타내었다.



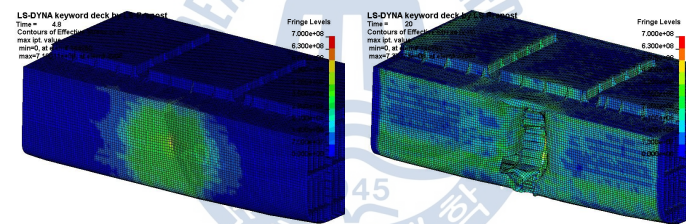




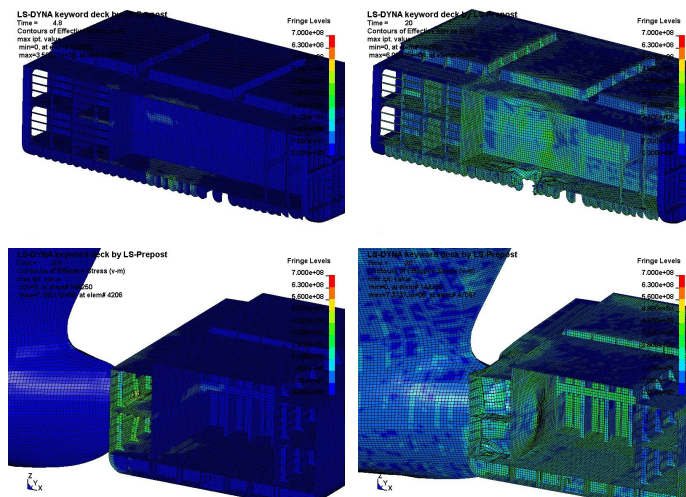
(d) close iso view

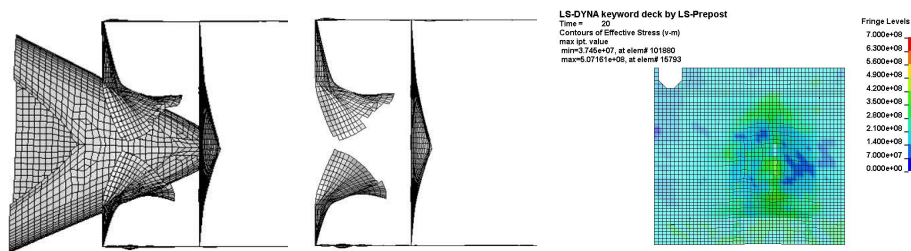


(e) damage configuration of side hull and struck ship



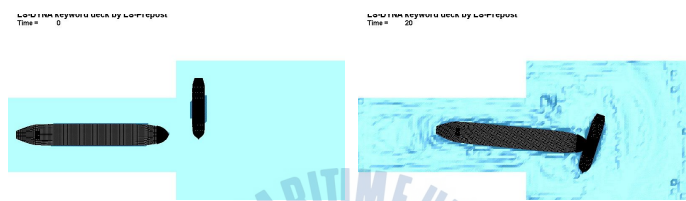
(f) damage configuration of side hull of striking ship



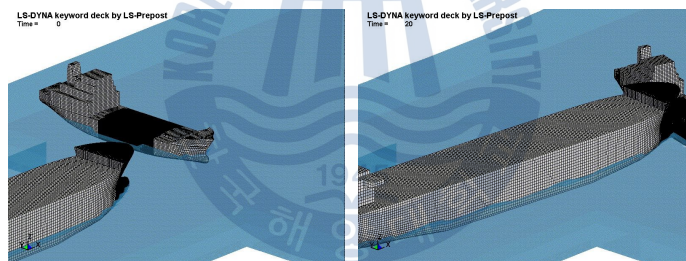


(g) damage configuration of side inner hull of striking ship

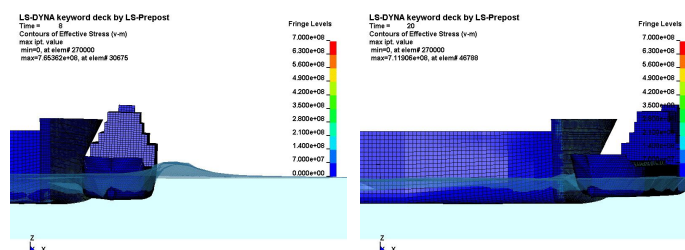
**Fig. 25** Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in standstill



(a) overall plane view

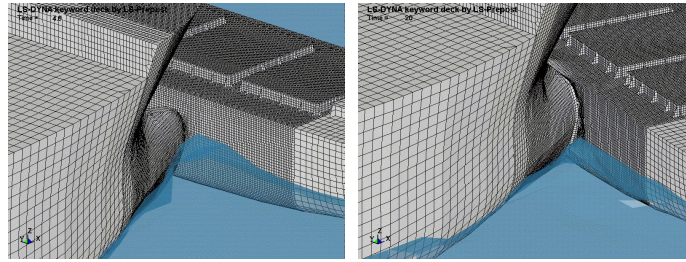


(b) overall iso view

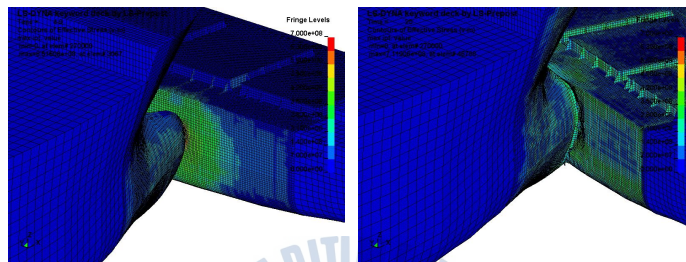


(c) overall side view

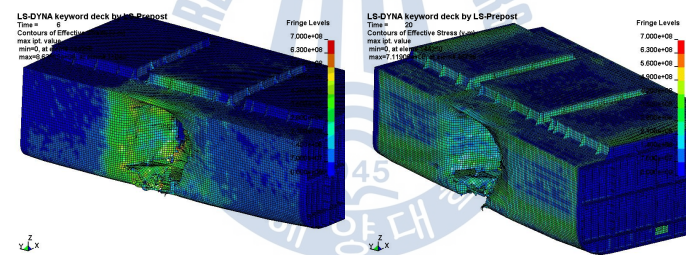




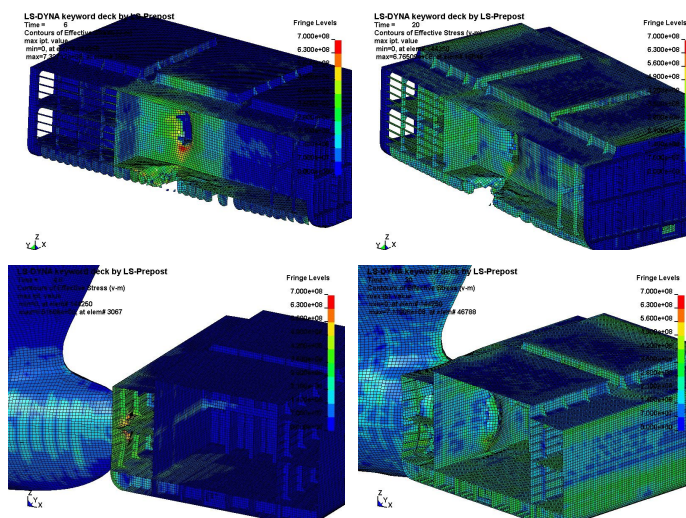
(d) close iso view

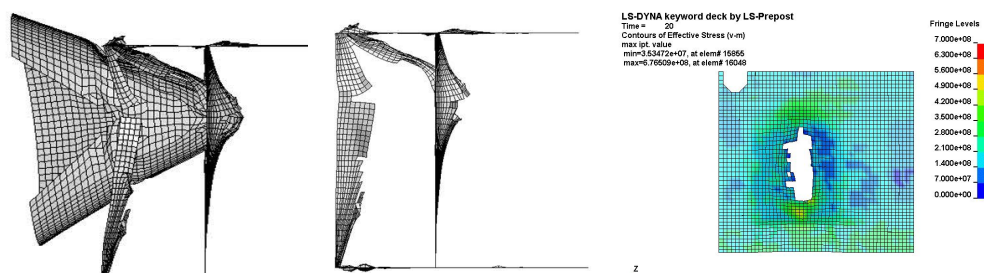


(e) damage configuration of side hull and struck ship



(f) damage configuration of side hull of striking ship



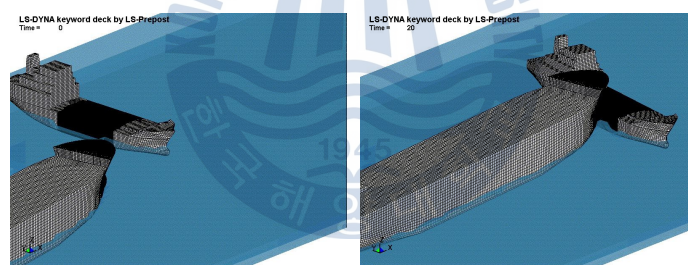


(g) damage configuration of side inner hull of striking ship

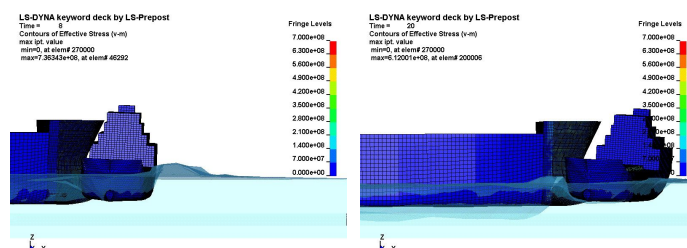
**Fig. 26** Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with perpendicular in service



(a) overall plane view

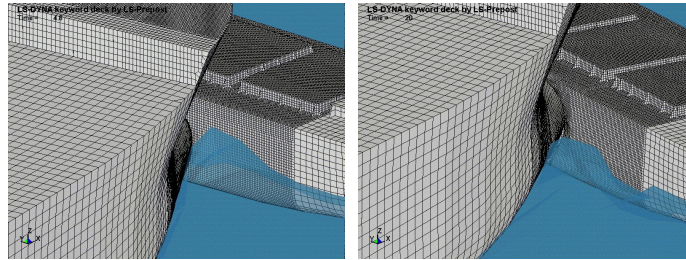


(b) overall iso view

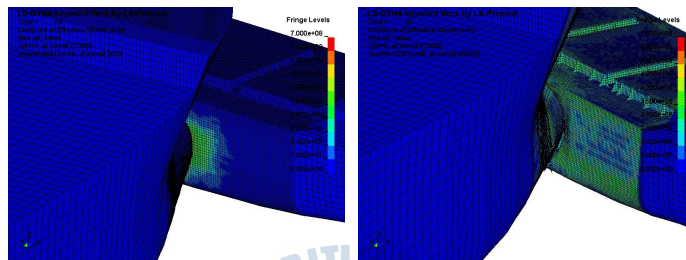


(c) overall side view

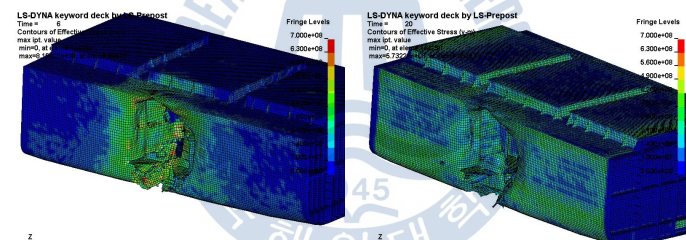




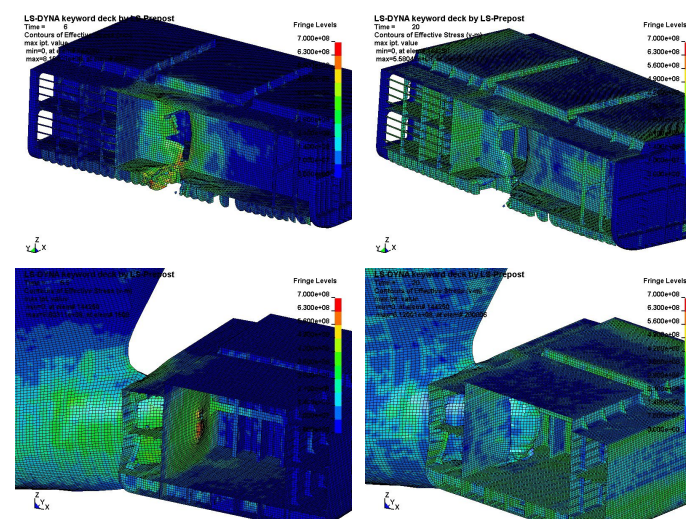
(d) close iso view

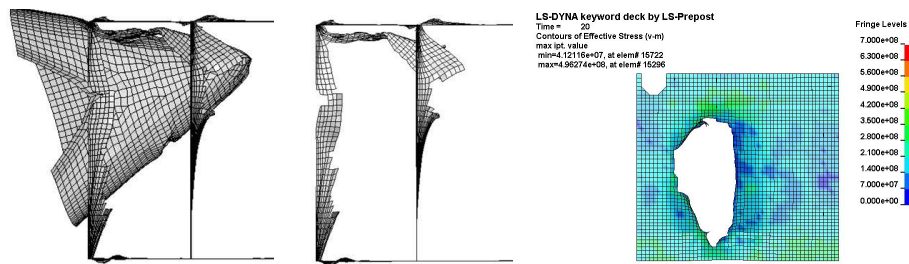


(e) damage configuration of side hull and struck ship

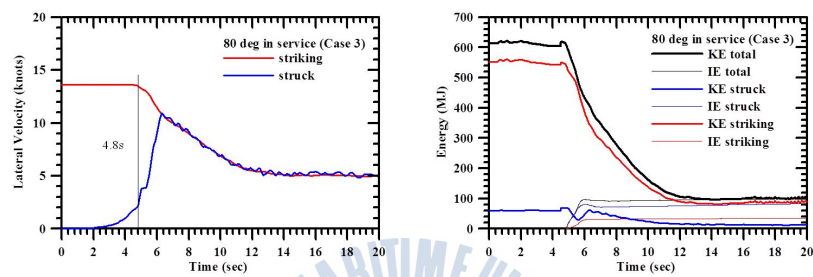


(f) damage configuration of side hull of striking ship





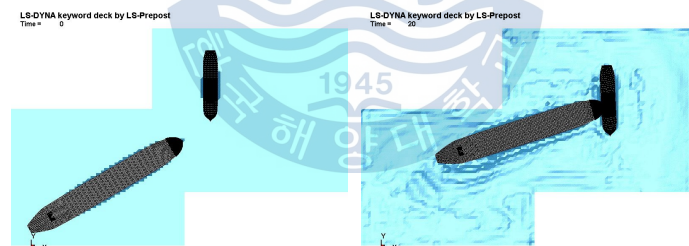
(g) damage configuration of side inner hull of striking ship



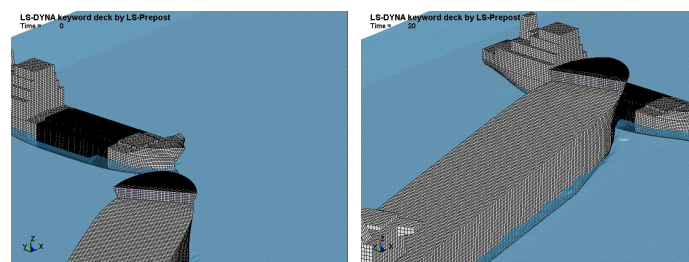
(h) lateral velocity

(i) kinetic & internal energies

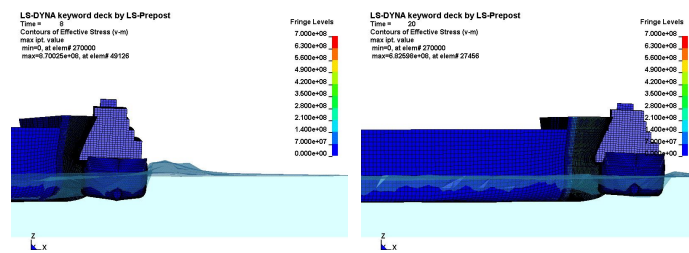
**Fig. 27** Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with attack angle  $80^\circ$  in service



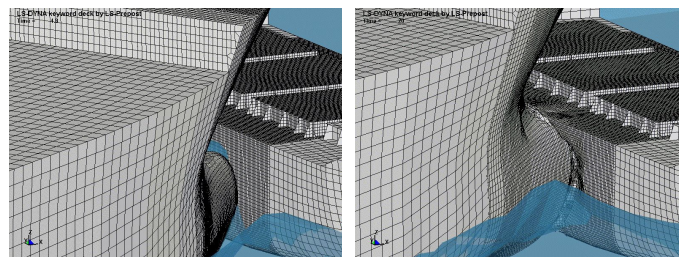
(a) overall plane view



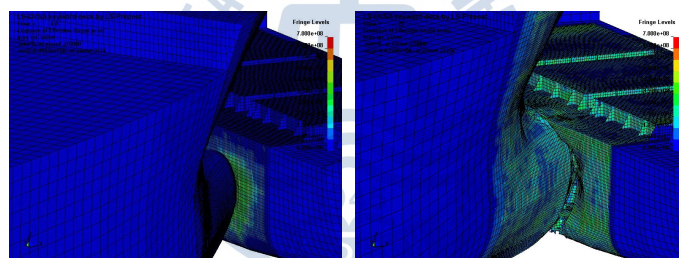
(b) overall iso view



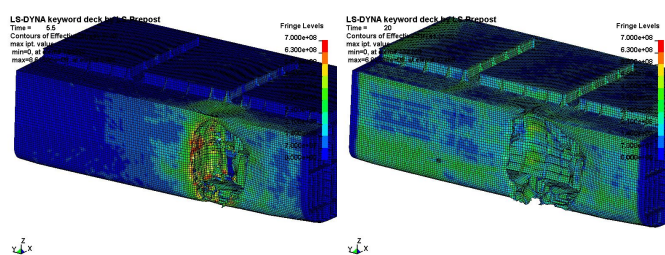
(c) overall side view



(d) close iso view

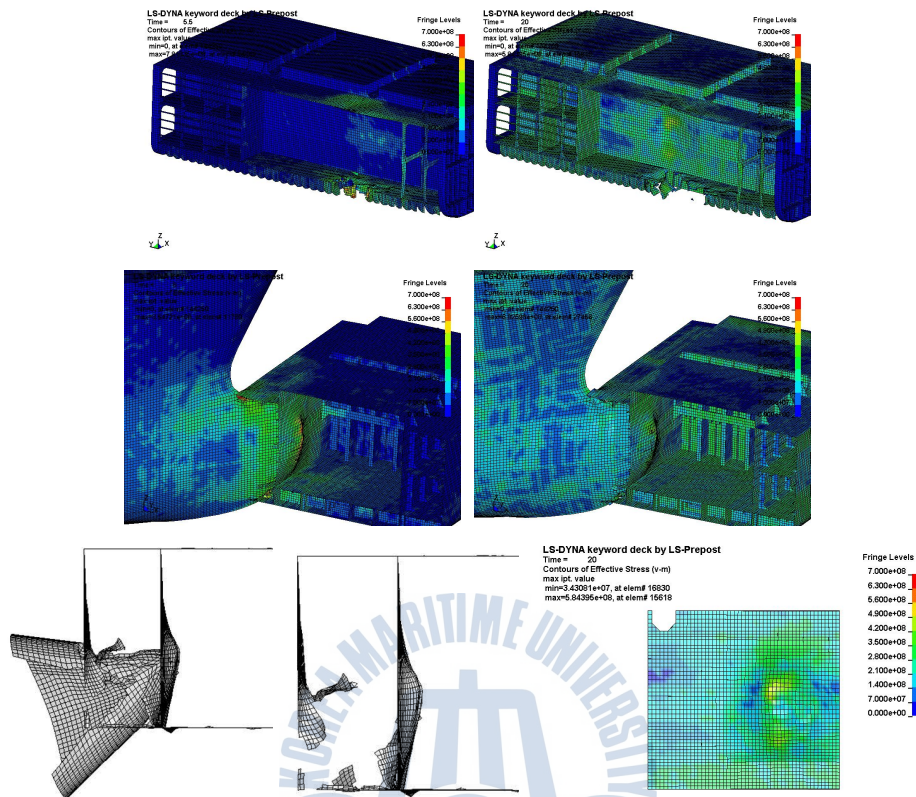


(e) damage configuration of side hull and struck ship



(f) damage configuration of side hull of striking ship





(g) damage configuration of side inner hull of striking ship

**Fig. 28** Collision response behavior of DWT 35,000 ton striking ship in ballast condition with attack angle 60° in service

피충돌선에 비하여 배수량이 매우 큰 충돌선이 경하상태에서 정지중이거나 항해중인 피충돌선에 수직 또는 예각으로 충돌하면 피충돌선의 선측외판은 파공이 크게 발생하고 선측내판에도 크게 손상이 발생하였다. Table 5에서와 같이 정지중이거나 운항중 예각(60°)으로 충돌한 경우 선측내판에 파공은 발생하지 않았지만 크게 dent하였고, 운항중일 경우 수직일 경우 보다는 예각(80°)으로 충돌할 경우가 가장 큰 파공이 발생하였다. 만재상태의 피충돌선이 정지중이거나 운항중인 피충돌선에 충돌할 경우에는 충돌선의 구상선수부가 피충돌선의 아래에서 충돌하게 되어 선수부로 인하여 선측외판은 크게 dent되었으나 선측내판에는 파손이 발생하지 않았다.

Fig. 27(h) & (i)에서와 같이 피충돌선은 두 선박의 간섭효과로 인하여 충돌하기 전에 약 2.0 knots로 옆으로 움직이기 시작하였으며 피충돌선의 내부에너지(internal energy)가 충돌선의 내부에너지보다 훨씬 크게 발생하였다는 것을 알 수 있었다. 또한

충돌선의 매우 큰 운동에너지(kinetic energy)는 두 선박의 내부에너지에 비하여 크게 소실되었고 유체의 내부 및 운동에너지로 저장되었다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 일반적인 무중력 상태에서의 일반적인 충돌 시뮬레이션에서는 고려할 수 없다는 것을 알 수 있었다.

**Table 5** Damage states in side inner hull of struck ship with DWT 35,000 ton striking ship

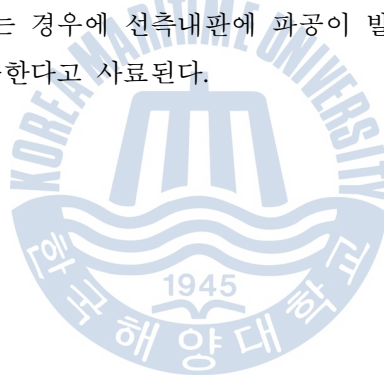
service condition	attack angle	damage state	rupture area
standstill	90°	dent(0.90m)	
service	90°	penetration(2.15m)	$1.23 \times 2.93 \text{ m}^2$
service	80°	penetration(2.95m)	$2.75 \times 5.75 \text{ m}^2$
service	60°	dent(1.10m)	



### 3.6 충돌 시나리오에 따른 선측구조 안전성 평가 고찰

2,600톤의 피충돌선은 비슷한 크기의 일반 선박에 비하여 선측 탱크 폭(3.19m)이 상당히 넓고 선측 상부구조의 강성이 커서 500톤부터 35,000톤에 이르는 5가지 크기의 다양한 선수부 구조를 갖는 선박들과의 실선 충돌 시뮬레이션을 통한 결과에서 알 수 있듯이 내충돌에 매우 우수한 선박이라는 것을 알 수 있었다.

충돌선의 강성이 큰 선수구조부의 방폐물 운반선박의 선측 화물창과의 상대적인 위치로 보아 10,500톤 및 35,000톤의 대형 충돌선은 경하상태에서 충돌하는 시나리오가 가장 큰 충돌 손상을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 점에서 만재상태의 특수선이 약 2배 정도의 배수량을 갖는 경하상태에서의 10,500톤의 정지 및 운항 중일 경우의 충돌 시나리오에 대하여 충분히 안전하다는 것을 확인할 수 있었고, 약 6배 정도의 배수량을 갖는 경하상태의 35,000톤의 대형 충돌선에 대해서 운항 중인 두 선박이 수직이나 80°로 충돌하는 경우에 선측내판에 파공이 발견하였다는 것은 내충돌 성능이 우수하다는 것을 입증한다고 사료된다.

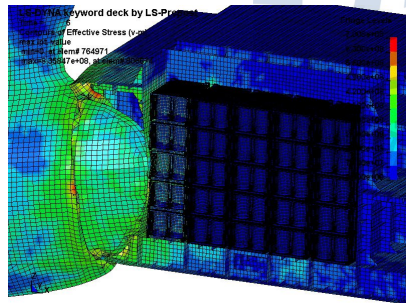


## 제4장 운반용기 및 운반물의 내충돌 안전성 평가

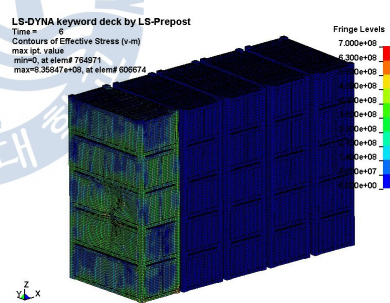
Table 2에서 열거한 8종의 운반용기와 7종의 운반물에 대한 내충돌 안전성 평가를 위해 경하상태의 35,000톤 유조선이 최대설계속력으로 만재상태의 피충돌선에 예각 80°로 충돌한 충돌 시나리오에 대하여 Fig. 14에서와 같이 운반용기를 4번째 화물창의 shell guide에 적재하고 만재상태에서의 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

### 4.1 운반용기 및 운반물의 내충돌 응답해석 결과

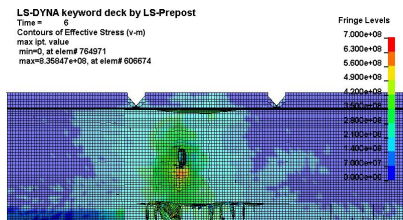
Fig. 10에서의 5종 운반용기에 4가지 운반물을 적재한 경우의 운반용기 및 운반물의 내충돌 응답해석 결과를 Figs. 29~33에 나타내었다.



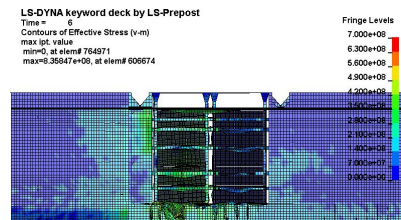
(a) midship section



(b) iso view of one layer container boxes



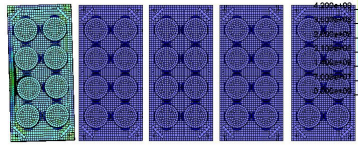
(c) side inner hull shell



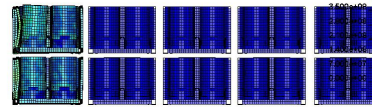
(d) container boxes without side inner hull



LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 764971  
max=6.35847e+08, at elem# 506674

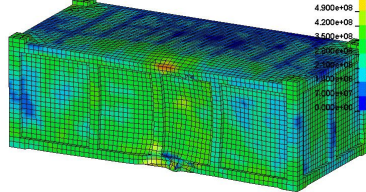


LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 764971  
max=7.56321e+08, at elem# 863626

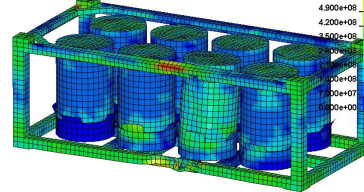


(e) plane view of one layer container boxes (f) side view of one layer container boxes

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=15.1243, at elem# 615099  
max=5.79032e+08, at elem# 610382

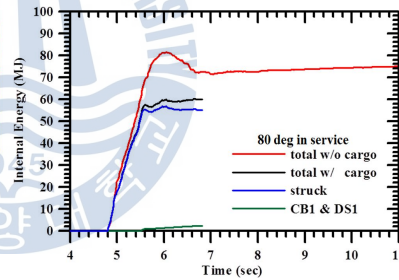
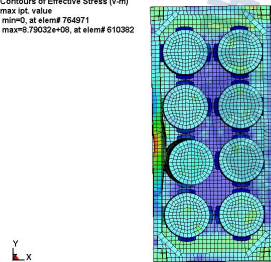


LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=4.72857e+06, at elem# 602285  
max=5.79032e+08, at elem# 610382



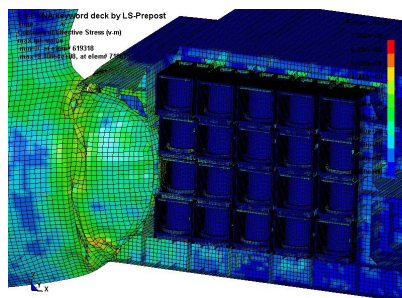
(g) iso view of container box (h) iso view of container box w/o side shell & cover

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 764971  
max=6.79032e+08, at elem# 610382



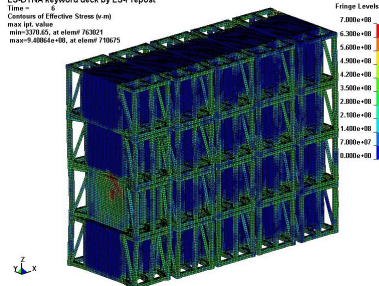
(i) plane view of container box w/o cover (j) internal energy

**Fig. 29** Damage response behavior of CB1 container box & DS1 steel drum



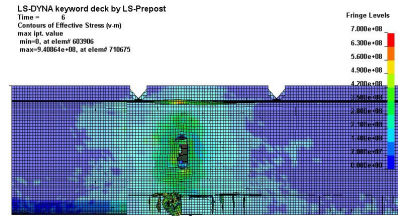
(a) midship section

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost  
Time = 5.6  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max ipt. value  
min=0, at elem# 764971  
max=9.48864e+08, at elem# 718675



(b) iso view of one layer container boxes

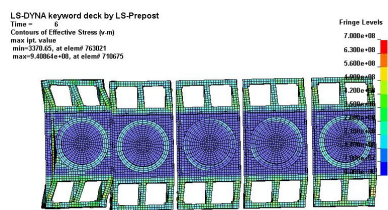




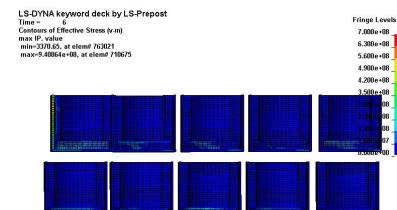
(c) side inner hull shell



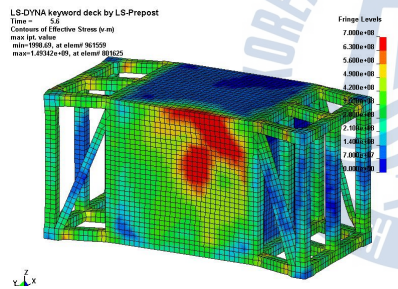
(d) container boxes without side inner hull



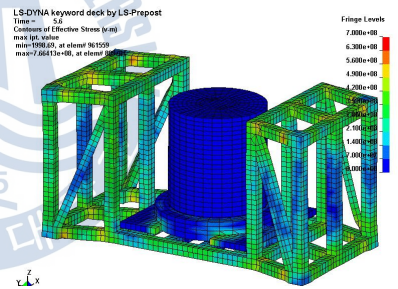
(e) plane view of one layer container boxes



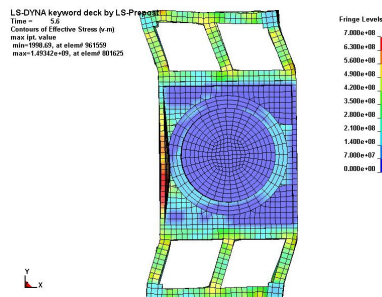
(f) side view of one layer container boxes



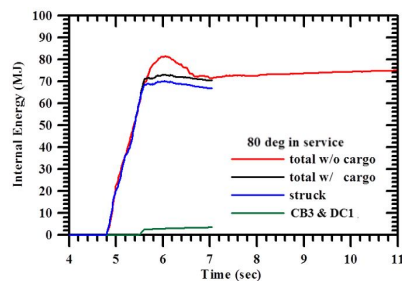
(g) iso view of container box



(h) iso view of container box w/o side shell & cover

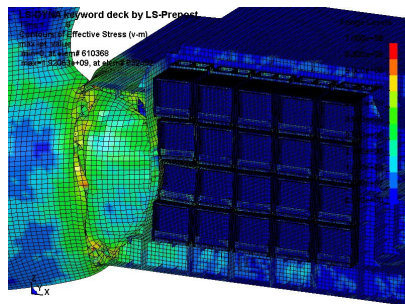


(i) plane view of container box w/o cover

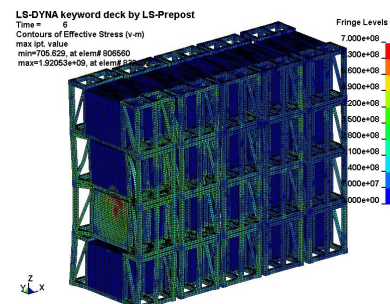


(j) internal energy

**Fig. 30** Damage response behavior of CB3 container box & DC1 concrete drum



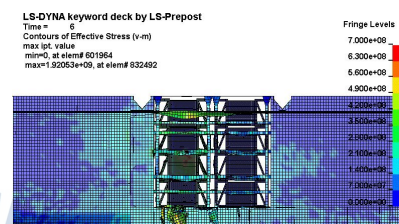
(a) midship section



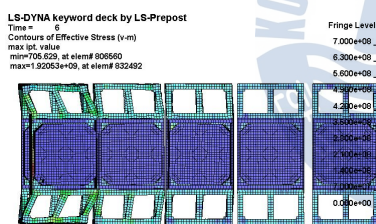
(b) iso view of one layer container boxes



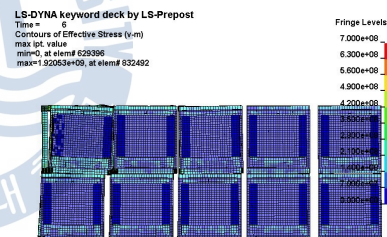
(c) side inner hull shell



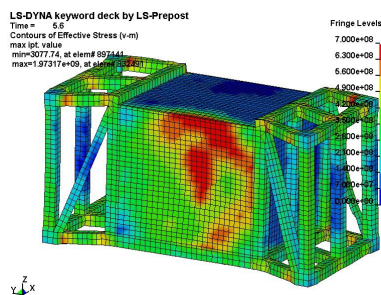
(d) container boxes without side inner hull



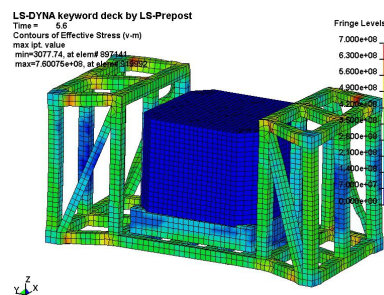
(e) plane view of one layer container boxes



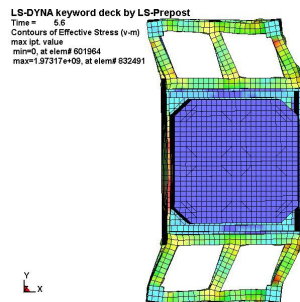
(f) side view of one layer container boxes



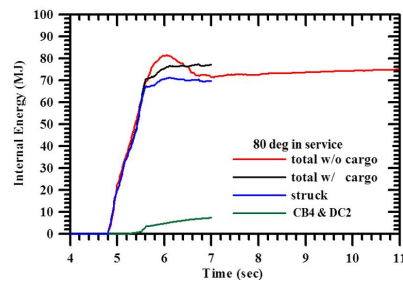
(g) iso view of container box



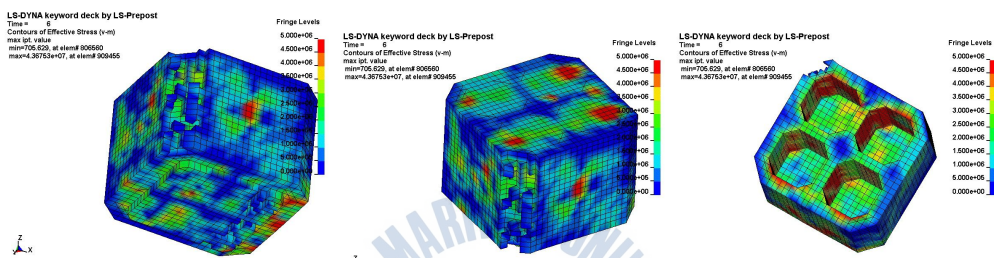
(h) iso view of container box w/o side shell & cover



(i) plane view of container box w/o cover

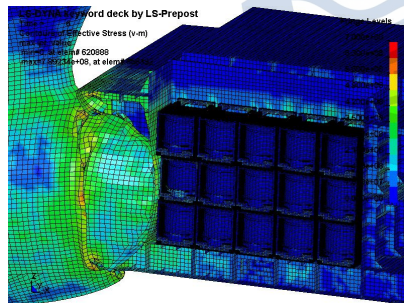


(j) internal energy

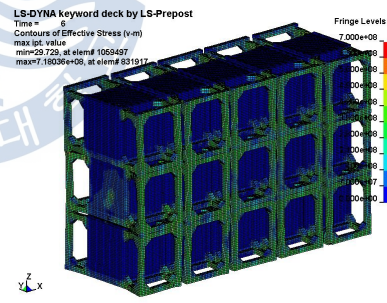


(k) down & upper view and inside view of drum

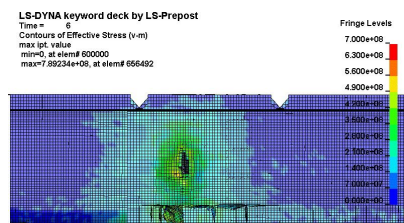
**Fig. 31** Damage response behavior of CB4 container box & DC2 concrete drum



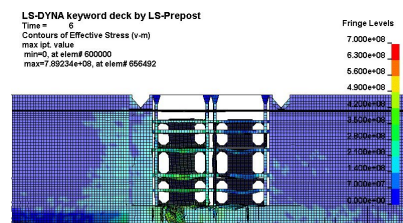
(a) midship section



(b) iso view of one layer container boxes

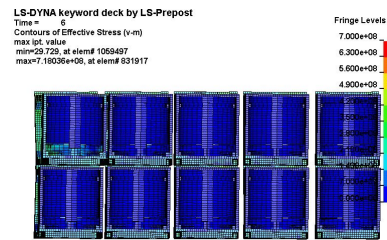
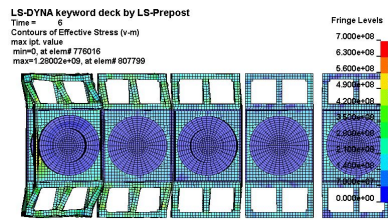


(c) side inner hull shell

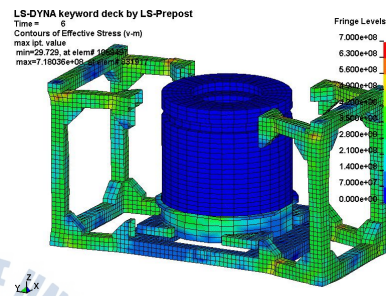
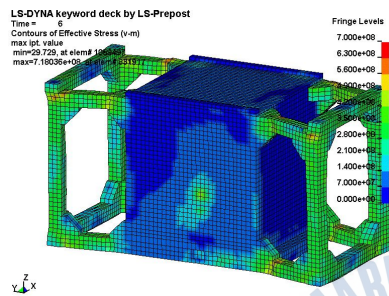


(d) container boxes without side inner hull

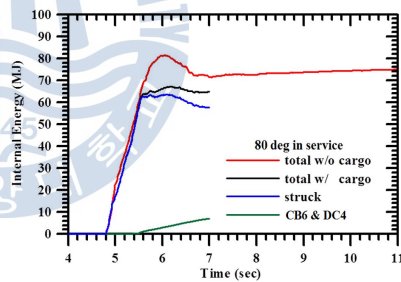
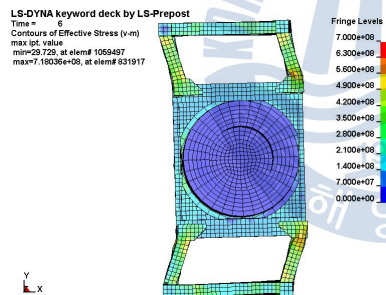




(e) plane view of one layer container boxes (f) side view of one layer container boxes

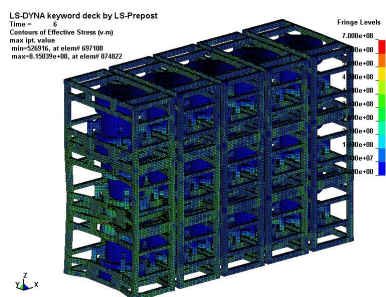
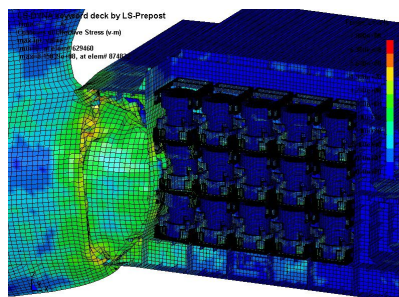


(g) iso view of container box (h) iso view of container box w/o side shell & cover

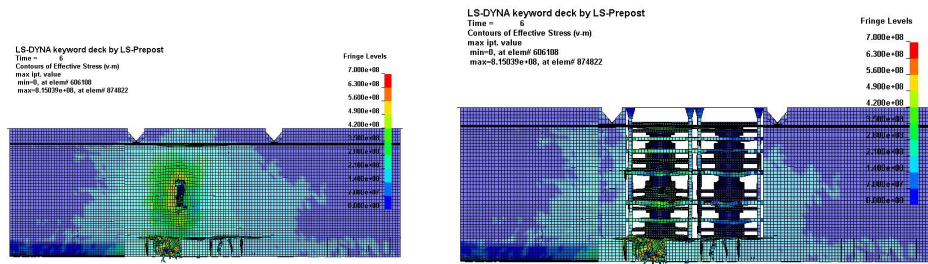


(i) plane view of container box w/o cover (j) internal energy

**Fig. 32** Damage response behavior of CB6 container box & DC4 concrete drum

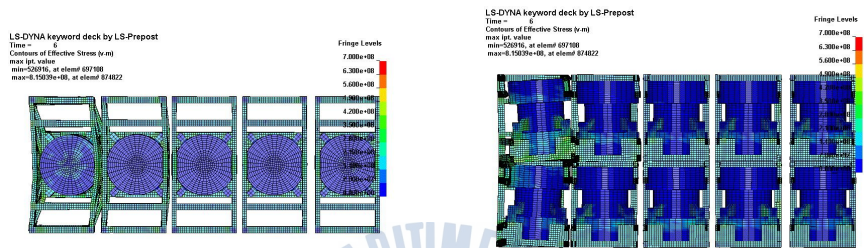


(a) midship section (b) iso view of one layer container boxes

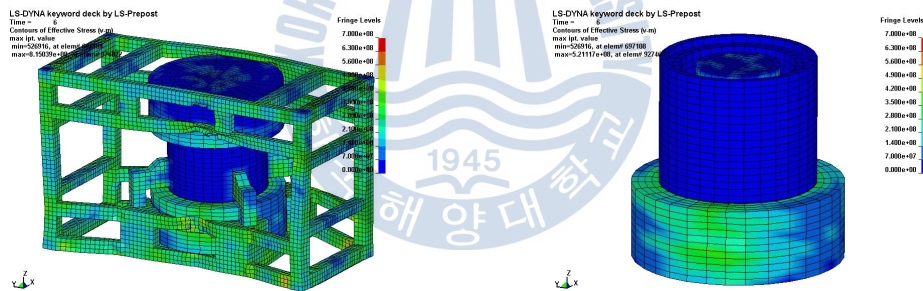


(c) side inner hull shell

(d) container boxes without side inner hull

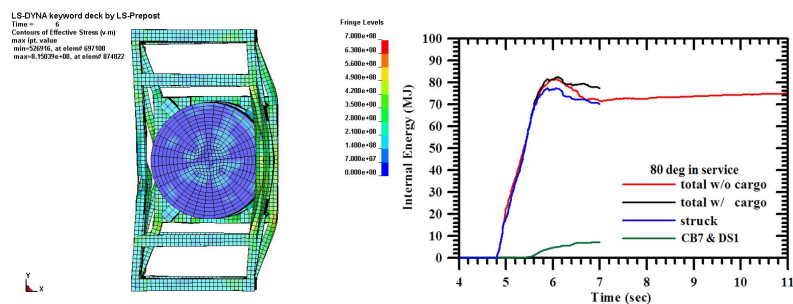


(e) plane view of one layer container boxes (f) side view of one layer container boxes



(g) iso view of container box

(h) iso view of container box w/o side shell & cover



(i) plane view of container box w/o cover

(j) internal energy

**Fig. 33** Damage response behavior of CB7 container box & DS1 concrete drum



## 4.2 운반용기 및 운반물의 내충돌 안전성 평가 고찰

우선 화물창 내 shell guide에 운반용기를 탑재한 경우 Figs. 29~33의 (a)~(b)에서 볼 수 있듯이 모든 운반용기에 대하여 전반적으로 선측내판의 파손(파공)이 매우 작아졌고 DWT 35,000톤 유조선 충돌선의 구상선수부는 운반용기의 형태에 따라 차이가 있지만 선측내판을 관통하지 못하였다. 이것은 화물창 내 shell guide에 탑재된 운반용기들이 내충돌에 크게 기여하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 목적 중에 하나로서 충돌 사고 시 특수선의 선체구조 뿐만 아니라 운반물(철재 및 콘크리트 드럼)을 포함한 운반용기의 내충돌에 대한 구조적 안전성 평가를 수행하는 것으로 각 운반용기 및 드럼의 파손을 점검하였다.

본 연구에서 수행한 운반물을 포함한 운반용기는 Table 2에서의 운반용기와 운반물과의 관계와 Figs. 10 및 11에서의 유한요소 모델에서 알 수 있듯이 크게 철재 드럼과 콘크리트 드럼을 보관하기 위한 운반용기의 형태에 따라 내충돌에 대한 파손 형태가 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 철재 드럼(DS1 및 DS2)을 보관하는 운반용기 CB1, CB2 및 CB5는 여러 개의 철재 드럼을 보관하기 위해 프레임(frame)에 대체로 얇은 철판(12.0mm)과 커버(cover)를 일체로 하나의 컨테이너 박스로 제작된 것이고, 콘크리트 드럼을 보관하기 위한 운반용기 CB3, CB4 및 CB6은 드럼 1개만을 보관하기 위하여 각각 50.0mm, 30.0mm 및 70mm 정도의 두꺼운 철판과 커버를 프레임과 일체로 만들고 shell guide에 탑재하기 위하여 일정한 크기의 규격으로 프레임을 이용하여 제작한 컨테이너 박스이다. 나머지 운반용기 BC7과 CB8은 각각 145mm 및 200mm의 두께의 강철 실린더 통에 SA240-304로 cladding 한 캐스크(cask)를 아래 위에 10mm 철판으로 제작된 원통형 base로 보호하여 철재 및 원형 콘크리트 드럼을 적재하고 프레임으로 규정 컨테이너 박스를 제작한 것이다.

Fig. 29의 (g)~(i)에서 알 수 있듯이 철재 드럼 보관용 운반용기 CB1, CB2 및 CB5는 얇은 철판과 프레임으로 구성된 하나의 컨테이너 박스로서 충돌선 구상선수부의 충돌에 의하여 국부적으로 dent가 발생하고 부분적으로 찢어진 것을 발견할 수 있었다. Figs. 30~33의 (g)~(i)에서와 같이 콘크리트 드럼 보관용 운반용기 CB3, CB4 및 CB6과 철재 드럼 보관용 캐스크 CB7은 상대적으로 두꺼운 철판으로 1개의 드럼을 보관하도록 강성이 매우 크게 제작되고 상대적으로 강성이 작은 프레임을 이용하여 일정한 규격의 컨테이너 박스를 제작한 것이어서 충돌선의 구상선수부에 의한 충격에도 철판은 충분한 강도로 손상이 없고 전체적으로 밀려나고 상대적으로 강성이 작은 프

레이프 구조들은 매우 큰 변형이나 파손이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 마지막 캐스크형 CB8은 앞에서 언급한 컨테이너 박스와 달리 정방형 규격의 컨테이너 박스로 충분한 공간을 확보한 shell guide에 적재하여 base와 프레임에 국부적으로 큰 변형이 발생하였다.

이상에서와 같이 운반물 드럼을 보관하는 컨테이너 박스의 형태에 따라 철재 드럼 보관용 일체형 컨테이너 박스는 전반적으로 강성이 작아 충돌선 구상선수부의 충격에 따른 손상이 국부적으로 발생하여 Fig. 29의 (b), (e)~(f)에서와 같이 안쪽의 컨테이너 박스에는 충격이 전달되지 않았지만, 강성이 큰 드럼 보관용 구조물에 프레임을 연결한 정규 규격의 컨테이너 박스는 Figs. 30~33의 (b), (e)~(f)에서와 같이 구상선수부의 충격에 충분히 전달될 수 있어 상대적으로 약한 프레임 구조에 큰 손상이 발생하여 안쪽 컨테이너 박스에도 충격이 전달되었다는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 보관용 캐스크형 CB8 컨테이너 박스는 강성이 강한 캐스크를 base와 프레임으로 정방형 규격으로 제작되어 국부적으로 base와 프레임에만 큰 변형을 발생하였고 shell guide도 충분한 공간이 확보되어 안쪽의 컨테이너 박스에는 충격이 전달되지 않았다.

CB1 및 CB2의 DS1과 DS2 철재 드럼은 CB5의 4개의 철재 드럼을 적재하는 경우와 달리 8개를 적재하는 관계로 컨테이너 박스와 드럼 사이의 공간이 다소 작고, 컨테이너 박스의 강성도 작아 충돌선의 구상선수부의 충격에 의해 철재 드럼은 부분적으로 국부적인 dent가 발생하였으나 찢어지는 손상은 발생하지 않았다. 그 이외에 콘크리트 드럼을 적재하는 컨테이너 박스는 대체로 두꺼운 철판으로 구성되어 있어 충돌선의 구상선수부에 의한 직접적인 충격은 발생하지 않았으나 DC2 콘크리트 드럼의 밑 부분과 옆 모서리 부분이 간접적인 충격에 의해 부분적으로 부서진 것을 Fig. 31(k)에서 발견할 수 있었다. 그러나 드럼 안쪽에는 파손된 부분이 발견된 않았다. 이와 같이 강성이 큰 구조는 충격을 흡수하는데 미흡하므로 바닥의 support나 base 등이 충격을 잘 흡수할 수 있도록 설계가 되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 고려한 DWT 35,000톤 유조선과의 충돌사고는 매우 특별한 경우로서 특수선의 크기와 유사한 일반 선박이 이 유조선과 충돌한다면 매우 큰 손상이 예상된다. 또한 운반용기의 적재로 인한 내충돌 안전성에 크게 기여하고 있다는 것도 확인할 수 있었다.

## 제5장 실선 좌초 시뮬레이션을 통한 구조 안전성 평가

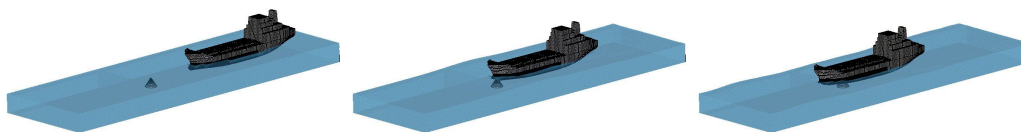
### 5.1 실선 좌초 시뮬레이션 결과

암초를 포함한 특수선인 좌초선박의 전반적인 모델의 Fig. 8(g), 좌초 시나리오와 연 계된 좌초선박 선저부에서의 암초높이 및 암초모델의 Fig. 9, 유체-구조 연성 해석기 법을 이용한 좌초 시나리오의 Fig. 20에 대한 실선 좌초 시뮬레이션 결과를 Figs. 34 ~35에 나타내었다.

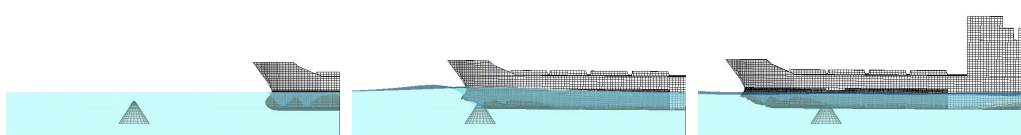
일반적인 암초와의 좌초 시뮬레이션에서는 공기 중에서 중력을 고려할 수 없기 때 문에 좌초선박을 수면 상에 한정하여 운항하도록 하고 있다. 이러한 경우 좌초선박은 시나리오에서 설정한 암초와의 높이와 위치에서 강제적으로 선저구조와의 충돌로 인 한 파손과정을 겪게 됨으로 매우 보수적인 응답과 거동을 얻게 된다. 또한 공기 중에 서 중력을 고려하지 않을 경우 좌초선박은 암초와의 충돌 순간의 선박 속도를 초기속 도로 설정하기 때문에 초기 운동에너지는 선저구조와의 강제적인 손상으로 인해 손실 되어 멈추게 된다.

본 연구에서 적용한 유체-구조 연성 해석기법을 사용하면 좌초선박은 해수 중에서 부력에 의해 부상되고 운항하면서 외부 물체와의 충돌에 의한 운동(motion)할 수 있 어 수면 상에 제한할 필요가 없다. 또한 일반적으로 운항 중인 선박이 긴급한 상황에 서도 갑자기 정지시킬 수 없으므로 본 연구에서는 운항 속도를 유지하도록 선박 종심 선 방향으로 추진력을 주었고, 선박이 선회할 경우에도 선박 종중심선 방향으로 연속 적으로 추진력이 가하도록 하였다. 외부 물체와의 충돌로 인한 운동에너지가 소실될 경우에는 자연스럽게 감소되도록 하였다.

일반적으로 해수를 고려하지 않을 경우 본 연구에서 고려중인 선저에서의 암초 높 이가 2.00m(선저 내저판에서 0.75m)는 선저내저판에 dent, 파단 등을 포함하여 매우 큰 손상을 주겠지만 본 연구에서 적용한 유체-구조 연성 해석 기법과 추진력을 적용 하여 실제 좌초 상황에 적합하도록 실선 시뮬레이션을 수행한 결과는 전반적으로 실 제 좌초사고 시의 손상 거동을 잘 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.



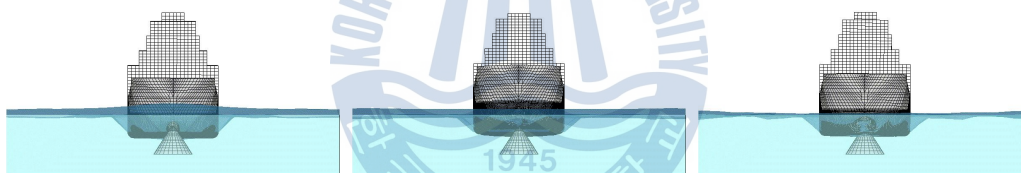
(a) overview in sea water



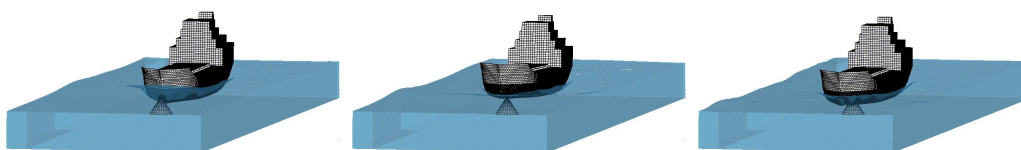
(b) side view in sea water



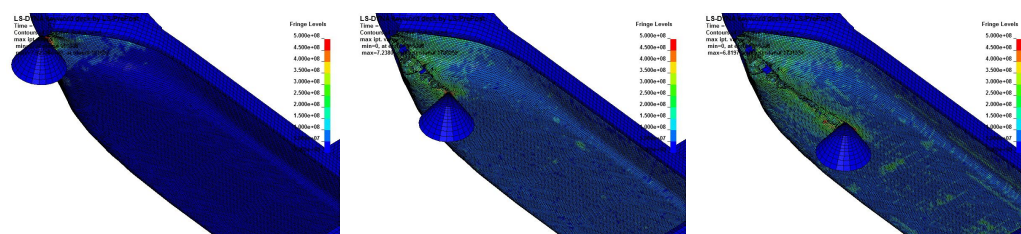
(c) plane view in sea water



(d) front view in sea water

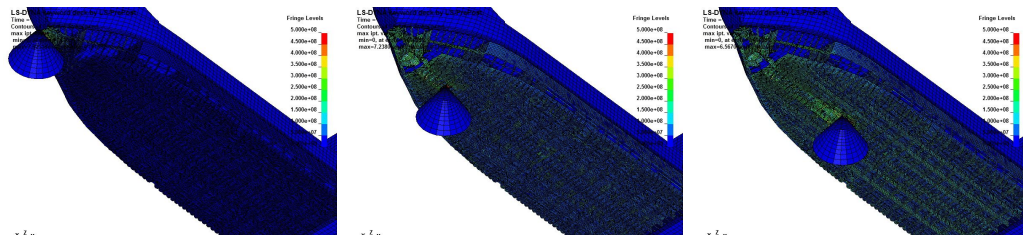


(e) iso view in sea water

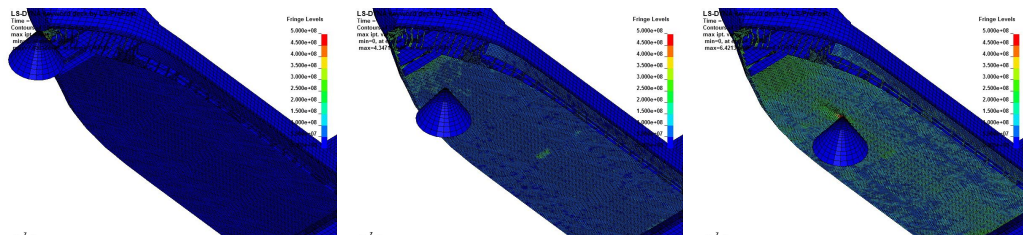


(f) grounding damage behavior in bottom shell

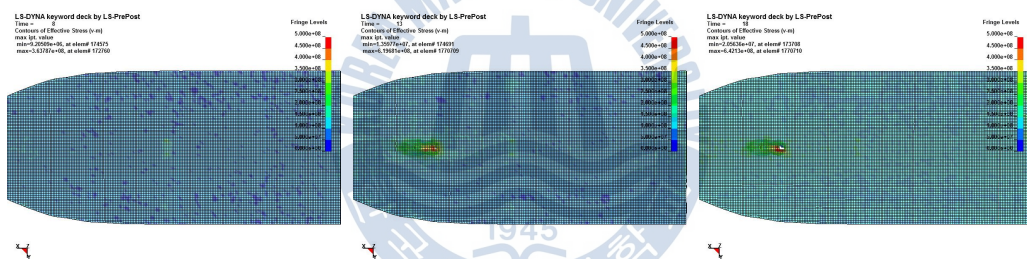




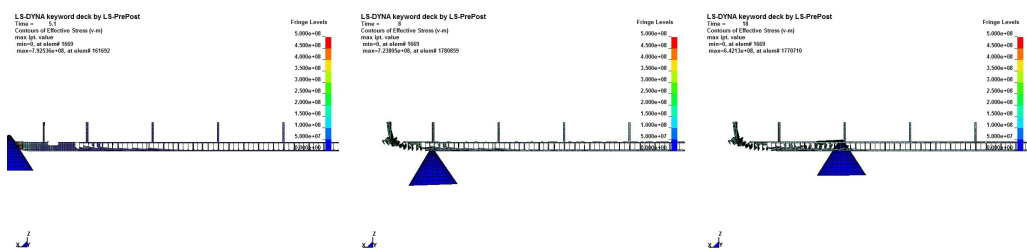
(g) grounding damage behavior in bottom structure w/o shell



(h) grounding damage behavior in bottom inner hull



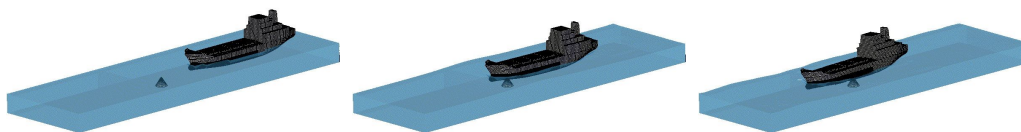
(i) plane view of grounding damage behavior in bottom inner hull



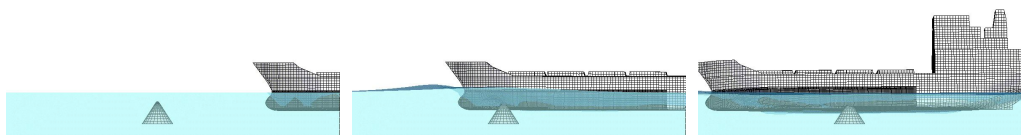
(j) side view of grounding damage behavior in bottom structure

**Fig. 34** Grounding response behaviors in full loading condition with rock position center

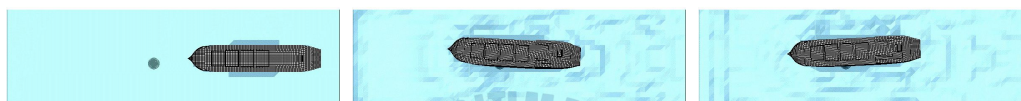




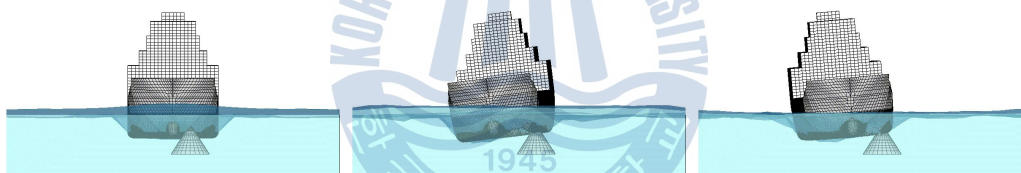
(a) overview in sea water



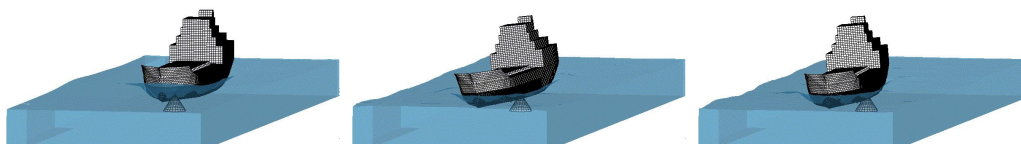
(b) side view in sea water



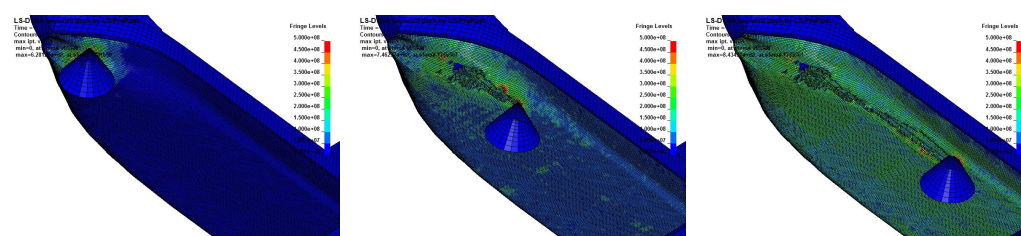
(c) plane view in sea water



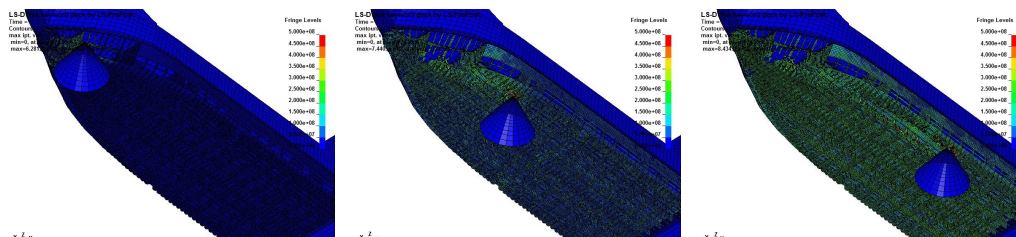
(d) front view in sea water



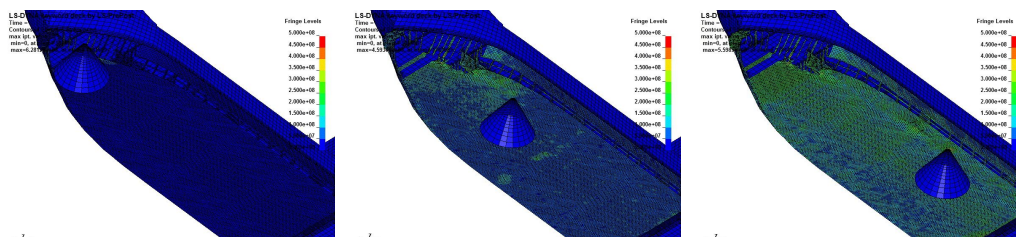
(e) iso view in sea water



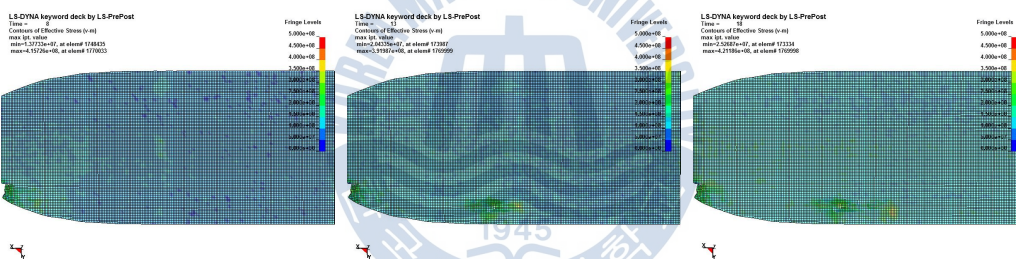
(f) grounding damage behavior in bottom shell



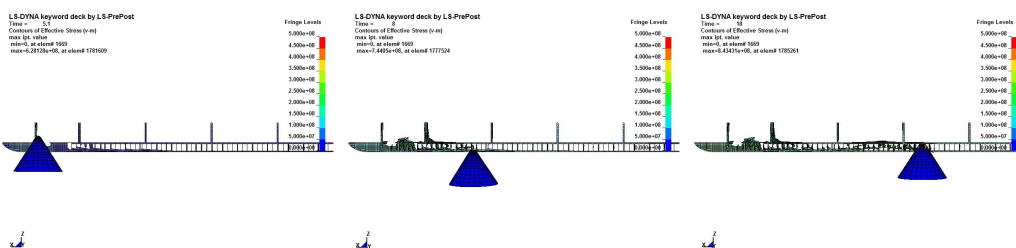
(g) grounding damage behavior in bottom structure w/o shell



(h) grounding damage behavior in bottom inner hull



(i) plane view of grounding damage behavior in bottom inner hull



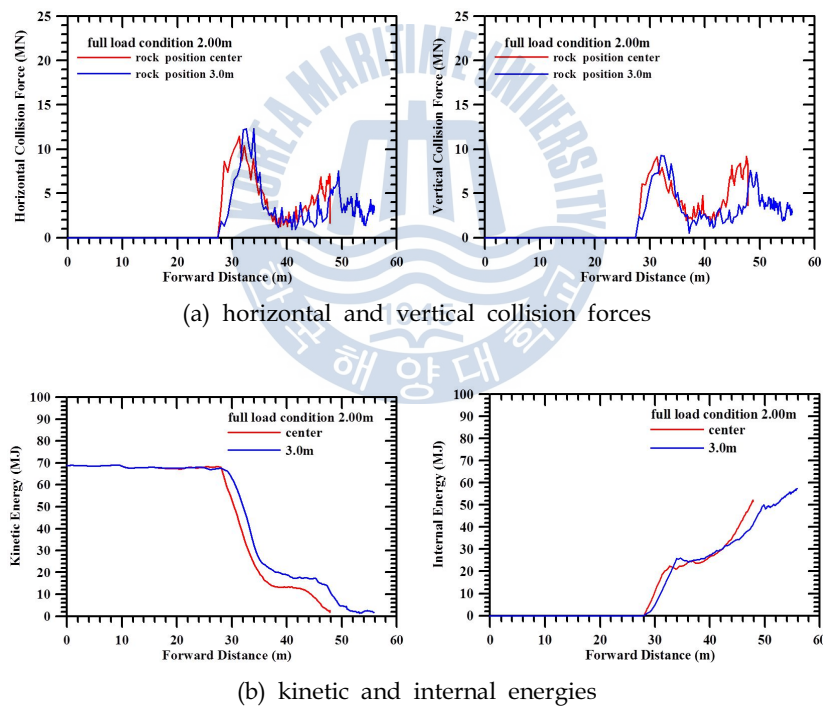
(j) side view of grounding damage behavior in bottom structure

**Fig. 35** Grounding response behaviors in full loading condition with rock position 3.0m off

## 5.2 좌초선박 선저부의 좌초에 따른 안전성 평가

만재상태 좌초선박이 선체중앙에 있는 암초와 충돌하였을 때 Figs. 33(h) 및 33(i)에 서와 같이 암초높이가 선저 내저판에서 0.75m일 경우 첫 번째와 두 번째 화물창 사이의 선저 횡격벽에서 멈추면서 매우 작은 파단이 발생하였으나 안전성에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

Fig. 36은 만재상태에서의 암초위치에 따른 좌초선박의 암초에 대한 상대적 진전거리(m), 좌초선박의 전진속력(knot) 및 수직속력(knot), 전진방향 및 수직방향의 충돌력(horizontal & vertical collision force, MN)과 운동 및 내부에너지(kinetic & internal energy, MJ)의 응답을 그래프로 나타내었다.



**Fig. 36** Grounding response in full load condition with rock position center and 3.0m off

좌초선박은 암초와 충돌한 직후 선수부가 가장 크게 손상을 받으며 위로 약간 위로 상승하다가 다시 하강하면서 암초와 접촉하면서 파손에 저항하는 과정을 Figs. 34~35의 시나리오 따른 거동 응답에서 알 수 있고 Fig. 36의 응답 그래프에서 확인할 수 있다. 암초위치가 좌초선박의 종중심선에서 벗어난 경우 좌초선박은 암초와 충돌한 후 암초와의 접촉부위를 중심으로 선회하고 있음을 확인할 수 있었고, 선저부 선측을 따라 암초가 진행하고 있다는 것을 알 수 있었다.

### 5.3 선저부의 좌초에 따른 안전성 평가 고찰

본 특수선은 비슷한 크기의 일반 선박에 비하여 선측 탱크 폭(3.19m)이 상당히 넓고 선측 상부구조의 강성 또한 커서 실선 충돌 시뮬레이션을 통한 안전성 평가에서 알 수 있듯이 내충돌에 매우 우수한 선박이라는 것을 알 수 있었다. 앞에서 언급하였듯이 이중저 높이(1.25m)는 일반선박과 별 차이가 없는데도 본 연구에서 고려한 좌초 시나리오에 대하여 만재상태에서 최대설계속력으로 운항하다 선저 내저판에서 0.75m 솟아 있는 암초와 충돌하여도 내저판에는 매우 미미한 파손만 발생하였다는 것은 횡 및 종부재들의 적절한 배치로 내좌초에 우수하다는 것을 시사하고 있다고 사료된다.



## 제6장 결 론

본 연구는 위험 또는 고가 화물의 해상운반 중 운반선박(특수선)의 충돌 및 좌초사고로 야기되는 운반선박과 운반용기(운반화물 드럼 포함)에 미치는 손상 정도를 고도정밀 비선형 동적해석 시뮬레이션 프로그램 LS-DYNA를 사용한 실선(full-scale ship) 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 수행하여 정량적으로 분석하였다. 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션은 LS-DYNA 코드의 유체-구조 연성(FSI; Fluid- Structure Interaction) 해석 기법을 사용하여 선박을 부력에 의해 해수에 부양(floating) 시키고 항해하는 선박을 추진력에 의해 항해하도록 시뮬레이션을 수행함으로써 일반적으로 무중력 진공(void) 상태에서의 선박 충돌 및 좌초 시뮬레이션에 비하여 매우 실제적(realistic)이고 정확한(accurate) 내충격 평가를 수행할 수 있었다.

톤수에 따라 5가지 종류의 충돌선(striking ship)을 고려하였고 만재 및 경하상태의 충돌선 선수부가 최대운항속도로 정지 또는 최대설계속력으로 운항중인 만재상태의 피충돌선(struck ship) 특수선의 선측을 충돌하는 시나리오로 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하였고, 피충돌선이 정지된 경우에는 충돌각도 수직( $90^\circ$ )만을 고려하였고, 운항중일 경우에는 수직 및  $80^\circ \sim 60^\circ$ 의 예각의 충돌각도로 충돌하는 시나리오를 고려하였다. 또한 최대설계속력으로 운항중인 좌초선박 특수선이 만재상태로 선체 중앙과 중앙에서 3.0m의 선측에 있는 암초와 충돌하는 실선 좌초 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 암초는 선저로부터 2.0m 위로 올라와 있는 경우를 고려하였다.

DWT 2,600톤의 특수선은 비슷한 크기의 일반 선박에 비하여 선측 탱크 폭(3.19m)이 상당히 넓고 선측 상부구조의 강성 또한 커서 DWT 500톤부터 35,000톤에 이르는 5가지 크기의 다양한 선수부 구조를 갖는 선박들과의 실선 충돌 시뮬레이션을 통한 결과에서 알 수 있듯이 내충돌에 매우 우수한 선박이라는 것을 알 수 있었다. 약 6배 정도의 배수량을 갖는 경하상태의 35,000톤의 대형 충돌선의 구상선수부가  $80^\circ$  및 수직으로 선측구조에 충돌하는 경우에만 선측내판에 파공이 발생하였다는 것은 본 특수선 운반선박의 내충돌 성능이 우수하다는 것을 입증한다고 사료된다. 본 특수선의 이중저 높이(1.25m)는 일반 선박과 크게 차이가 없었지만 본 연구에서 고려한 만재상태



에서 최대설계속력으로 운항하다 선저 내저판에서 0.75m 솟아 있는 암초와 충돌하는 좌초 시나리오에 대하여 내저판에는 매우 미미한 파손만 발생하였다는 것은 선저부의 횡 및 종부재들의 적절한 배치로 내좌초에 우수하다고 사료된다.

7종의 운반물(2종의 철재 드럼 및 5종의 콘크리트 드럼)을 포함한 8종의 운반용기의 안전성 평가는 가장 손상이 크게 발생한 경하상태의 35,000톤 충돌선이 만재상태의 피충돌선과 80° 예각으로 충돌하는 시나리오에 대하여 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 충돌 시뮬레이션 다시 수행한 후 운반용기의 안전성 평가를 수행하였다. 화물창 내 shell guide에 운반용기를 탑재한 경우 모든 운반용기에 대하여 전반적으로 선측내판의 파손(파공)이 매우 작아졌고 DWT 35,000톤 유조선 충돌선의 구상선수부는 특수선의 선측내판을 관통하지 못하였다. 이것은 화물창 내 shell guide에 탑재된 운반용기들이 내충돌에 크게 기여하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

철재 드럼 보관용 운반용기는 얇은 철판과 프레임으로 구성된 하나의 컨테이너 박스로서 충돌선 구상선수부의 충돌에 의하여 국부적으로 dent가 발생하고 부분적으로 찢어졌지만 철재 드럼에는 충격이 전달되지 않았으나 컨테이너 박스에 비하여 많은 철재 드럼을 적재하는 경우 컨테이너 박스와 드럼 사이의 공간이 작아 철재 드럼은 부분적으로 국부적인 dent가 발생하였으나 찢어지는 손상은 발생하지 않았다. 콘크리트 드럼 보관용 운반용기는 두꺼운 철판으로 1개의 드럼을 보관하도록 강성이 매우 크게 제작되고 상대적으로 강성이 작은 프레임을 이용하여 일정한 규격의 컨테이너 박스를 제작한 것이어서 충돌선의 구상선수부에 의한 충격에도 철판은 충분한 강도로 손상이 없고 전체적으로 밀려나고 상대적으로 강성이 작은 프레임 구조에 큰 손상이 발생하여 안쪽 컨테이너 박스에도 충격이 전달되었으나 대부분 의 콘크리트 드럼에 손상은 발생하지 않았다. 사각형 콘크리트 드럼의 밑 부분과 옆 모서리 부분이 간접적인 충격에 의해 손상이 발생하였으나 드럼 안쪽에는 파손이 발생하지 않았다. 이와 같이 강성이 큰 구조는 충격을 흡수하는데 미흡하므로 바닥의 support나 base 등이 충격을 잘 흡수할 수 있도록 설계가 되어야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- Aquelet, N., Souli, M., and Olovsson, L., 2006. Euler - Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, pp.110 - 132.
- Lee, S.G., 2007. *A Study on Double Bottom Structural Criterion of Small Oil Tanker*, Report of Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea.
- LSTC, 2011. *LS-DYNA User's Manual*, Version 971R5, Livermore Soft Technology Corp., USA.
- Rodd, J. and Sikora, J. 1995. Double hull grounding experiments, *Proceedings of the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.446-456.
- Souli, M., Ouahsine, A., and Lewin, L., 2000. ALE formulation for fluid-structure interaction problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190, pp.659-675.

## 감사의 글

아무것도 모르고 시작했던 2년 동안의 대학원 생활을 마치면서, 그동안 저에게 많은 도움을 주신 이상갑 교수님께 감사의 말씀을 먼저 드립니다.  
저의 잘못된 점을 고쳐주시고, 그동안 포기하고 싶었던 때도 많았지만, 끝까지 저를 잡아주신 교수님께 매우 존경을 표합니다.

그리고 본 논문을 위해 시간을 내어 심사해 주신 박석주 교수님, 손경호 교수님께도 감사드리고, 그동안 석사과정동안 저에게 많은 배움과 도움을 주신 조선해양시스템 교수님들께도 감사의 인사를 올립니다.

석사과정 2년 동안 조선해양시스템공학부에 있으면서, 힘든 일도 많이 있었지만 옆에서 힘이 되주었던, 대학원생 선배형들과 그리고 실험실에 들어오지는 얼마되지 않았지만, 열심히 해주고 있는 환수, 장기한테도 응원의 메시지를 보냅니다.

하루 산을 넘으면, 그 앞에 넘어야 할 많은 산들이 더 있듯이, 앞으로도 그 높이가 어땠든 지금처럼 아무렇지 않게 열심히 산을 오르겠습니다.  
끝으로 지금까지 믿고 응원해주신 부모님과 가족들에게도 감사의 말씀을 드리며 본 논문을 선물로 바칩니다.

